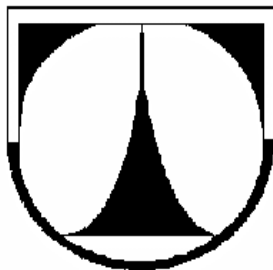


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



Disertační práce

k získání akademického titulu Ph.D.

ve studijním oboru

Výrobní systémy a procesy – Aplikovaná kybernetika

Ing. Petr Oliva

Porovnání modelů řízeného a neřízeného natáčení fotovoltaických článků

Školitel: prof. Ing. Miroslav Olehla

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Výrobní systémy a procesy

Zaměření: Aplikovaná kybernetika

Obsah

Seznam zkratk	5
1 Cíle práce	8
2 Metodika	9
3 Úvod	11
4 Vývoj a stav fotovoltaiky v ČR	14
4.1 Průmysl, trh a výzkum v ČR	16
4.2 Znalosti o fotovoltaice	17
4.3 Energetická politika v EU	18
4.4 Předpoklady rozvoje v ČR	19
4.4.1 Charakteristika slunečního záření v ČR	20
4.4.2 Odhad teoretického potenciálu FV v ČR	20
4.4.3 Předpokládaný vývoj do roku 2010 v ČR	22
5 Fotovoltaické články	23
5.1 Fotoefekt	24
5.2 Struktura fotovoltaických článků	24
5.3 Princip fotovoltaických článků	25
5.4 Konstrukce solárních článků	28
5.5 Rozdělení fotovoltaických systémů	30
5.6 Závislosti fotovoltaického článku na teplotě a osvětlení	32
5.7 Náhradní schéma fotovoltaického článku	33
5.7.1 Výpočet hodnot I_{ph} , U_T , I_0 , R_{pv}	39
5.7.2 Výpočet vnitřního sériového a paralelního odporu	41
5.7.2.1 Výpočet vnitřního sériového odporu	41
5.7.2.2 Výpočet vnitřního paralelního odporu	42
5.8 Výpočet maximálního výkonu	43
6 Geometrie pohybu Slunce	44
6.1 Sluneční deklinace	45
6.2 Výška Slunce nad obzorem	47
6.3 Azimut Slunce	50
6.4 Východ Slunce, západ Slunce a délka dne	52
7 Energie ze Slunce	57
7.1 Průchod slunečního záření zemskou atmosférou	57
7.2 Intenzita slunečního záření	59
7.2.1 Určení polohy Slunce nad obzorem	59
7.2.2 Přímé sluneční záření	60
7.2.3 Difusní sluneční záření	61
7.2.4 Výsledná energie ze slunečních paprsků	63
7.2.5 Výsledná energie v závislosti na albedu, znečištění a nadmořské výšce	65
8 Princip stínění	67

8.1	Délka stínu vrženého vodorovnou plochou.....	67
8.2	Délka stínu vrženého svislou plochou.....	68
9	<i>Nastavení bodu MPP.....</i>	70
9.1	Princip MPP Trackeru	71
9.2	Algoritmus a schéma pro MPP Tracker	72
10	<i>Příklad nastavení solárního panelu.....</i>	75
11	<i>Způsoby řízení fotovoltaických panelů</i>	76
11.1	Ruční nastavení	76
11.1.1	S pevným úhlem sklonu	76
11.1.2	S proměnným úhlem sklonu	79
11.1.2.1	Pro letní a zimní provoz.....	79
11.1.2.2	Pro čtyři roční období	80
11.2	Pasivní systémy.....	82
11.2.1	Princip natáčení pomocí hydraulických válců	82
11.2.2	Princip natáčení pomocí rozdílných hustot teplé a studené kapaliny	82
11.3	Řízení aktivními systémy	84
11.3.1	Řízení dle času.....	84
11.3.1.1	Řízení v dle času v jedné ose	85
11.3.1.2	Řízení dle času ve dvou osách	86
11.3.2	Řízení dle skutečné polohy Slunce	87
11.3.2.1	Řízení s pomocí vrženého stínu na snímací prvky.....	87
11.3.2.1.1	Řízení v jedné ose s pomocí vrženého stínu na snímací prvky.....	87
11.3.2.1.2	Řízení ve dvou osách s pomocí vrženého stínu na snímací prvky.....	89
11.3.2.2	Řízení s pomocí přídavného oboustranného fotovoltaického panelu.....	91
12	<i>Laboratorní model řízeného natáčení fotovoltaických článků dle času.....</i>	94
12.1	Hlavní použité součásti	94
12.2	Princip modelu řízení dle času	94
12.3	Konstrukční popis modelu řízení dle času	95
12.4	Řídící algoritmus modelu řízení dle času	96
12.5	Naměřená data z modelu řízení dle času.....	99
12.5.1	Data z letního provozu řízeného panelu dle času	99
12.5.2	Data ze zimního provozu řízeného panelu dle času.....	102
13	<i>Laboratorní model řízeného natáčení fotovoltaických článků dle Slunce.....</i>	104
13.1	Hlavní použité součásti	104
13.2	Princip modelu řízení dle skutečné polohy Slunce.....	104
13.3	Konstrukční popis modelu řízení dle skutečné polohy Slunce.....	105
13.4	Řídící algoritmus modelu řízení dle skutečné polohy Slunce.....	106
13.5	Zjednodušené blokové schéma řízení modelu dle polohy Slunce	108
13.6	Naměřená data z modelu řízení dle skutečné polohy Slunce	109
13.6.1	Data z letního provozu řízeného panelu dle skutečné polohy Slunce.....	109
13.6.2	Data ze zimního provozu řízeného panelu dle skutečné polohy Slunce	111
14	<i>Porovnání řízených i neřízených modelů</i>	113
14.1	Porovnání dvou řízených modelů	113
14.2	Porovnání panelů v letním provozu	115

14.2.1	Porovnání panelů řízených dle času a neřízených	115
14.2.2	Porovnání panelů řízených dle skutečné polohy Slunce a bez řízení	117
14.3	Porovnání panelů v zimním provozu	118
14.3.1	Model řízení dle skutečné polohy Slunce	118
14.3.2	Model řízení dle času.....	119
14.4	Porovnání teoretických výkonů panelů se získanými hodnotami.....	119
14.5	Souhrn porovnávaných hodnot.....	123
15	<i>Zhodnocení využitelnosti řízení v ČR pro oblast Liberecka</i>	<i>124</i>
16	<i>Ekonomické zhodnocení řízeného natáčení panelů.....</i>	<i>126</i>
16.1	Výpočet s výkony z letního provozu fotovoltaických panelů.....	126
16.2	Výpočet s výkony ze zimního provozu fotovoltaických panelů.....	128
16.3	Výpočet s použitím průměrného výkonu za letní a zimní provoz.....	130
16.4	Výkon odebraný řídicím systémem	132
16.4.1	Rentabilita nákladů pro letní provoz.....	133
16.4.2	Rentabilita nákladů pro zimní provoz.....	134
16.4.3	Rentabilita nákladů pro průměrný výkon z letního a zimního provozu.....	135
<i>Závěr práce</i>		<i>138</i>
<i>Literatura</i>		<i>141</i>
<i>Seznam obrázků.....</i>		<i>143</i>
<i>Seznam tabulek.....</i>		<i>146</i>
<i>Publikace k tématu</i>		<i>147</i>
<i>Publikace mimo téma</i>		<i>148</i>
<i>Přílohy.....</i>		<i>149</i>

Seznam zkratek

Zkrácené názvy:

MPP	.....	Maximal Power Point - Bod maximálního výkonu
PPP	.....	Power Point Peek – jiné označení pro bod maximálního výkonu

Řecké:

α	.....	úhel sklonu osluněné plochy od vodorovné roviny
δ	.....	sluneční deklinace
ε	.....	součinitel, který je závislý na výšce slunce nad obzorem a na nadmořské výšce daného místa
φ	.....	zeměpisná šířka
τ	.....	délka dne
τ_v	.....	západ Slunce
τ_z	.....	východ Slunce

Latinka malé:

a	.....	azimut Slunce
a_n	.....	azimut normály osluněné plochy
e_s	.....	délka stínu
e_v	.....	délka stínu
e	.....	elementární náboj
f_s	.....	spínací frekvence
h	.....	výška Slunce nad obzorem
h_1	.....	šířka vodorovné plochy [m]
h_2	.....	šířka svislé plochy
k	.....	Boltzmanova konstanta
r	.....	reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky, tzv. albedo

Latinka velké:

A	.....	plocha přechodu
C_v	.....	odebraná cena za 1 rok za výkup
C_p	.....	odebraná cena za 1 rok za prodej
D	.....	poměr zaneprázdnění

D_n	.....	difuzní koeficient elektronů
D_p	.....	difuzní koeficient děr
H	.....	nadmořská výška
I_D	.....	proud diodou
I_ε	.....	intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při dokonale čistém ovzduší
I_n	.....	intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při daném znečištění ovzduší
I_o	.....	uzavírací proud
I_0	.....	proud naprázdno
I_0	.....	sluneční konstanta
I_p	.....	intenzita přímého slunečního záření na obecně položenou plochu
I_{Dh}	.....	intenzita difusního záření na vodorovnou plochu
I_{ph}	.....	intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu
I_{ph}	.....	proud fotovoltaického článku
I_{pmax}	.....	maximální proud
I_{pn}	.....	intenzita přímého dopadajícího záření
I_{sc}	.....	zkratový proud
ΔI	.....	maximální změna proudu (např. 20%)
L_n	.....	střední difuzní délka elektronů
L_p	.....	střední difuzní délka děr
N_a	.....	koncentrace akceptorů
N_d	.....	doba návratnosti
N_D	.....	koncentrace donorů
P_o	.....	odebraný výkon za 1 průměrný den
P_r	.....	odebraný výkon za 1 rok
R	.....	zátěžový odpor vnějšího proudového okruhu (vnější spotřebič)
R_p	.....	paralelně zapojený odpor (nahrazuje povrchové rekombinační procesy)
R_{pv}	.....	fotovoltaické odpor
R_s	.....	sériově zapojený odpor (nahrazuje odpor polovodičů a kontaktů)
T	.....	sluneční úhel
U_D	.....	diodové napětí
U_{oc}	.....	napětí naprázdno

U_{Pmax}	.....	maximální napětí
U_T	.....	teplotní napětí
V_I	.....	vstupní napětí do DC/DC konvertoru
V_0	.....	výstupní napětí z DC/DC konvertoru
ΔV_c	.....	maximální změna napětí (např. 5%)
Z	.....	index znečištění

1 Cíle práce

Cílem této disertační práce bylo zvoleno několik následujících bodů, kterými se bude tato disertační práce zabývat.

Nastudovat podrobně problematiku fotovoltaických panelů, jejich typy, provedení, použité materiály, funkci a jejich užití v praxi.

Zjistit způsoby řízení fotovoltaických panelů, které se používají a popsat, jak který typ funguje.

Navrhnout způsoby nastavování sklonu fotovoltaického panelu kolem horizontální osy a navrhnout optimální úhly sklonu pro fixní úhel sklonu.

Pokusit se navrhnout vlastní způsob řízení a porovnat jej s řešením natáčení dle času. Tyto dva způsoby řízení porovnat s neřízeným panelem.

Sestavit laboratorní modely navrženého způsobu řízení a řízení dle času, které by sloužily pro reálné porovnání modelů.

Zhodnotit energii, kterou dodávají řízené a neřízené fotovoltaické panely a pokusit se vypočítat jejich ekonomickou návratnost. Vypočítat ekonomickou návratnost řídicího systému a stanovit, kolik energie denně je spotřebováno na řízení.

Zhodnotit využitelnost řízeného natáčení a použití fotovoltaických panelů v oblasti Liberecka.

2 Metodika

Zpracování tématu této disertační práce vyžaduje důkladnou teoretickou přípravu. Jedním z prvních kroků pro vypracování srozumitelného přehledu možností řízeného natáčení fotovoltaických panelů je podrobné seznámení se s touto problematikou v literatuře. V České republice je vhodné literatury akutní nedostatek, z vlastních zkušeností mohu říci, že žádná taková kniha v této oblasti u nás neexistuje. Toto tvrzení platí za předpokladu, že za literaturu zpracovávající toto téma nepovažuji výroky typu: „Solární panel musí být pro získání maxima energie vždy směřován kolmo na dopadající sluneční paprsky“. Jednou z možností otevírajících se pro člověka hledajícího informace o řízeném natáčení fotovoltaických panelů, je sáhnout po literatuře zahraniční. Avšak ani zde není v našem prostředí moc z čeho vybírat. Tituly, zabývající se touto problematikou, například časopisy Solar Energy nejsou u nás běžně dostupné.

Díky možnosti zahraniční stáže v rámci programu Socrates-Erazmus nabízené studentům na Technické univerzitě v Liberci, jsem měl možnost vycestovat na půl roku do německého městečka Zwickau, kde jsem studovat na Fach Hoch Schule. Tato odborná vysoká škola vlastní řízený fotovoltaický systém a tak bylo možné získat informace o způsobech nastavování fotovoltaického panelu kolem horizontální osy, což bylo po mých předchozích neúspěších při vyhledávání literatury velice motivující. Fotovoltaický systém se na této škole nastavoval čtyřikrát ročně do polohy, která odpovídá poloze dodávající maximální množství energie po daný časový úsek. Toto nastavování se provádí ručně. Nejcennější zkušeností bylo měření systému, četné konzultace a debaty s pracovníky zabývajícími se touto tematikou. Pobyt mi přinesl cenné zkušenosti s řešením řízení fotovoltaických panelů mimo Českou republiku a umožnil mi pochopit její význam ve společnosti.

Po podrobnějším seznámení s problematikou řízeného natáčení fotovoltaických panelů se naskytla možnost požádat o grant FRVŠ. Této nabídce jsem bezesbytku využil a navrhl jsem konstrukční řešení řízeného natáčení fotovoltaických panelů dle skutečné polohy Slunce a dle času. Z prostředků přiděleného grantu jsem realizoval oba modely řízeného natáčení fotovoltaických panelů. Na sestavených modelech byly ověřeny navržené způsoby řízeného natáčení. K velké radosti - úspěšně. Po obhájení grantu započalo měření na sestavených modelech.

Měření na řízených fotovoltaických panelech bylo rozděleno do dvou částí. První částí je zkušební měření v podzimních a zimních měsících, kdy byly porovnávány

hodnoty dodávané oběma panely, které slouží pro kalibraci hodnot při samotném měření. Byly vyzkoušeny postupy při měření a sestaveny měřicí obvody. Druhá část byla prováděna v jarních a letních měsících, kdy již bylo prováděno porovnávací měření. Každý typ měření byl proveden čtyřikrát a to porovnáním řízení dle času s neřízeným panelem, řízení dle skutečné polohy Slunce s neřízeným panelem a řízení dle času s řízením dle aktuální polohy Slunce. Ze získaných hodnot byly vybrány zástupci jednotlivých měření a ty jsou prezentovány. V průběhu všech měření nepanovaly ideální podmínky, neboť byla vždy část dne oblačnost, která ovlivňovala měření. Při prvních jarních měřeních bylo též zjištěno, že okolní kopce neumožňují sledovat polohu Slunce od východu do západu a proto počátek a konec měření neodpovídá přesně vypočteným hodnotám. Velkým problémem se též ukázalo, že budovy technické univerzity vrhají v brzkých ranních a odpoledních hodinách stín do míst, ze kterých je prováděno měření a proto musely být upraveny časy ukončení měření.

Po provedení potřebných měření a jejich vyhodnocení jsem došel k názoru, že sestavené modely jsou vhodné hlavně pro laboratorní účely a jejich reálné použití by vyžadovalo konstrukční zásah do přenosu momentu z motoru k otočnému rámu, aby byl odolný k povětrnostním podmínkám a v případě poruchy byl snadno opravitelný. Návrh lepší konstrukce bych považoval jako námět pro pokračování v této práci.

3 Úvod

V současné době hrozí, že se svět, svým nešetrným hospodařením s nerostnými surovinami v nejbližší době dostane do situace, kdy nebude ropa tryskat, plyn přestane syčet z podzemí a uhlí se nebude těžit obrovskými rypadly a vozit po vlcích do všech koutů světa.

Proto se mnoho odborníků po celém světě již delší dobu zamýšlí, jakým způsobem nahradit dosavadní způsoby získávání energie (spalování fosilních paliv).

Hovoří se o jaderné energii, která se již v mnoha státech používá, ta může být velice nebezpečná vzhledem k neustálé kontrole jaderných článků a jednou z největších hrozeb je vyhořelé palivo. Dají se s ním provést různé operace, počínaje shozením sudů s tímto palivem do moře, nebo zabetonování jej do země. Tyto způsoby se ještě před několika lety děly. V dnešní době existují speciální skládky nebezpečného jaderného odpadu, které jsou střezeny a jaderný odpad je zde ukládán podle velmi přísných norem EU.

Dalším ze způsobů získávání energie je již dlouhá léta diskutovaná studená fúze. Dle mého názoru je to v současné době námět spíše do science fiction, takže se k ní zatím nedá vzhlízet jako k budoucnosti, která nahradí naše současné spalování.

Využití geotermální energie – je jedním z udržitelných způsobů získávání energie. Geotermální energie, která je vlastně úplně zdarma, protože ji získáme z pod povrchu, který má v určitých hloubkách určitou neměnnou teplotu po celý rok. Je to teplo, které vydává zemské jádro a které je tímto způsobem získáváno. Nevýhodou tohoto čerpání je potřeba značných vstupních nákladů (ve stovkách tisíců). K čerpání této energie se využívá potrubí, kterým pak proudí kapalina, která se v určité hloubce ohřívá teplem uvolňovaným ze zemského jádra a proudí zpět k zemskému povrchu, kde slouží k ohřevu TUV (teplá užitková voda) nebo též k vytápění. Toto potrubí je buď zakopáno na pozemku budovy nebo umístěno ve vršku a pak využívá teplo z teplonosné kapaliny.

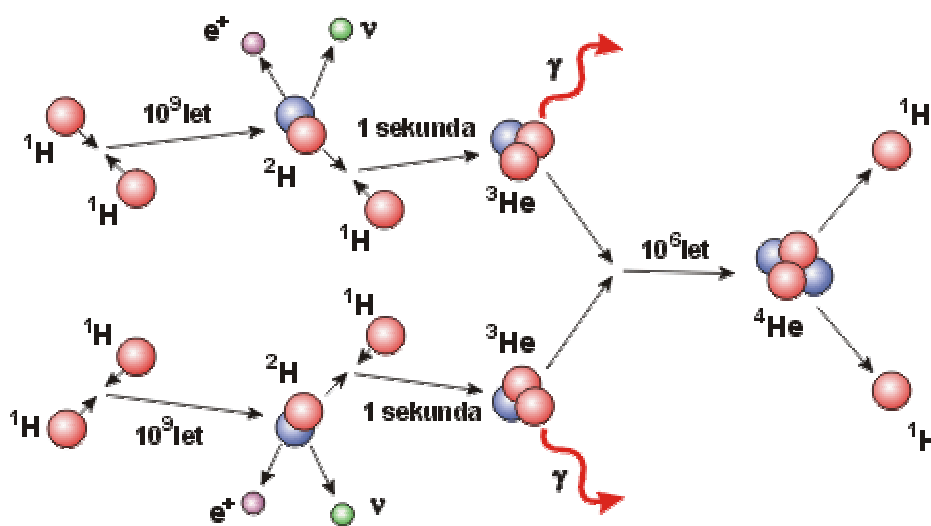
V poslední době se v televizních pořadech o ekologii dosti hovoří o získávání energie z biomasy. Spousta ekologů tento způsob podporuje. Jde vlastně o způsob, při kterém se na polích vypěstuje surovina, která je později spalována a z tohoto palování je čerpána energie. Tento způsob nezatěžuje okolní prostředí žádnými škodlivými prvky, protože všechny škodliviny, které při spalování vzniknou, jsou dalšími pěstovanými rostlinami zpátky pohlceny a tak vzniká rovnováha. Věřím, že pokud bychom začali toto získávání energie používat hromadně, nezbyla by na Zemi půda, na které bychom mohli

pěstovat suroviny, které jsou pro nás životně důležité (počínaje obilím a konče třeba melouny).

Jedním z prvních typů získání energie bylo použití vody. Dlouhá léta se voda používala pro pohony různých mlýnských kol, která dále poháněla mlýnské kameny a převáděla tak hybnou sílu vody na práci (například pohon pily, bucharu v kovárně atd.), kterou chtěl člověk zrovna provádět..

Jak člověk používal vodu k pohonu, tak využíval i vítr. V dnešní době je tomu obdobně. Vznikají větrné elektrárny, které se stavějí na místech, kde průměrná rychlost větru neklesne pod 6ms^{-1} a kde vlastně neustále fouká vítr. Využívají stejný princip jako vodní elektrárny, převádějí kinetickou energii větru na energii elektrickou pomocí motoru v generátorovém stavu.

Poslední, avšak neméně důležitý způsob získávání energie, kterému je věnována tato disertační práce, je energie získávána ze Slunce. Energie se ve Slunci uvolňuje termojadernou fúzí spočívající ve slučování jader vodíku ^1H (protonů) do jader hélia ^4He . Tento proces se nazývá proton-protonový řetězec a probíhá podle schématu znázorněného na následujícím obrázku (je to vlastně největší jaderná elektrárna v naší sluneční soustavě).



Obrázek 3.1 - Proton-protonový řetězec

Energetický výtěžek proton-protonového řetězce je 26,2 MeV, uvolněná energie je odnášena prostřednictvím fotonů a neutrin. Fotony, dopadající na Zemi, pak vnímáme

jako sluneční záření (fotony uvolněné během p-p řetězce mají kmitočty záření rentgenového, během stovky tisíc let trvající cesty k povrchu Slunce se jejich kmitočty transformují k nižším hodnotám). Aby mohlo ke slučování protonů docházet, je zapotřebí nesmírných teplot a i v podmínkách panujících v nitru Slunce (centrální teplota je zde 15 000 000 K) tento proces probíhá velice pomalu, jak je znázorněno na obrázku, měrný výkon je tak pouze 0,19 mW na jeden kilogram hmotnosti Slunce. O Slunci lze říci, že je to dokonalý řízený termojaderný reaktor, v němž se každou sekundu uvolní energie 4×10^{26} J přeměnou $6,4 \times 10^{11}$ kg vodíku na hélium. Slunce má v zásobě tolik paliva, že tento proces bude probíhat ještě zhruba 7 miliard let. Záření, které je vyzařováno od Slunce směrem k Zemi, je využíváno k vytváření elektrické energie. Jsou dvě možnosti jak energii využít. První je pomocí fotovoltaických článků převést sluneční energii na energii elektrickou s využitím fotovoltaického jevu, který energii dopadajících fotonů na PN přechod fotočlánku využívá na excitaci elektronů a tím vedení proudu. Druhou možností je vytvořit tepelnou energii také za pomoci energie dopadajících fotonů, kde se tato energie spotřebovaná k zastavení dopadajících fotonů, mění na teplo.

4 Vývoj a stav fotovoltaiky v ČR

V průběhu poslední dekády 20. století bylo využívání fotovoltaických systémů v České Republice spíše sporadické. Praktické aplikace byly téměř výhradně zaměřeny na malé ostrovní systémy pro nezávislé napájení objektů a zařízení v lokalitách bez připojení k rozvodné síti. Jednalo se vesměs o soukromé rekreační chaty, ve kterých fotovoltaický systém poskytuje možnost napájet osvětlení a drobné elektrické spotřebiče. Systém je v takovém případě sestaven většinou z jednoho solárního panelu (10–100W), akumulátorové baterie a regulátoru dobíjení. V některých případech bývá systém doplněn střídačem, který umožňuje připojit i běžné síťové spotřebiče.

Větší aplikací tohoto charakteru je například fotovoltaický systém s výkonem 370 W pro napájení osvětlení horské chaty. Na ulicích některých měst (např. Brno a Ostrava) byly nainstalovány parkovací automaty napájené z malých solárních panelů. V několika málo případech byly solární panely použity pro napájení měřicích, registračních a komunikačních zařízení instalovaných v terénu, kde se možnost přivedení elektrické sítě jevila velmi problematičnou, až takřka nemožnou.

Fotovoltaické panely a komponenty byly nabízeny několika málo prodejci jako zdroje nezávislého napájení pro kempink a jachting. Mezi první větší systémy v ČR patří spíše ukázkové systémy bez připojení k rozvodné síti. Ostrovní systém se střídačem s výkonem 550 W na ukázkovém RD v Kunovicích sloužil zároveň pro měření pracovníkům VUT v Brně. Instalace solárních panelů s výkonem 600 W na experimentálním ekologickém domě v Podolí u Brna je další z nich. V Osluchově bylo nainstalováno 16 solárních panelů s výkonem 50 W pro napájení veřejného osvětlení. Velmi pozvolna se objevovaly systémy s připojením na rozvodnou síť.

Prvním větším systémem byla fotovoltaická elektrárna na vrcholu hory Mravenečník v Jeseníkách. Elektrárnu s výkonem 10 kW financovala v roce 1998 společnost ČEZ, a. s. Po problémech souvisejících s její odlehlostí se vlastník rozhodl elektrárnu přestěhovat k informačnímu centru u jaderné elektrárny Dukovany. Na nové budově vedení společnosti Pražská energetika, a. s., v Praze ve Vršovicích byl v roce 2001 spuštěn do provozu demonstrační fotovoltaický systém s možností srovnat chování solárních panelů za různých podmínek – orientace, sklon a zastínění. Souhrnný instalovaný výkon solárních panelů je 2,55 kW.

Od roku 2000 pak nastává nová fáze vývoje fotovoltaiky v ČR. Postupně jsou státní správou a místní samosprávou zaváděny podpůrné nástroje na podporu fotovoltaiky, a to jak podporu demonstračních projektů, tak podporu vývoje a výzkumu.

Nicméně zatím ještě není jasně definovaný program rozvoje s měřitelným cílem. Současné aktivity vyplývající ze stávajících podpor mají demonstrační charakter s cílem zvýšit povědomí o fotovoltaiice.

Datum	Motivační nástroj
2000	Vyhlášení programu Slunce do škol (Státní fond životního prostředí)
1.1.2001	Zavedení zvýhodněné 5% sazby DPH pro fotovoltaické systémy
2001	První instalace z programu Slunce do škol
Od 1.1.2002	Zavedení povinnosti vykupovat elektrickou energii z malých zdrojů
Od 1.1.2003	Pokračování programu Slunce do škol
Od 1.1.2003	Program na podporu instalací fotovolt. systémů připojených k rozvodné síti
	Dotace 30% na investiční náklady pro fyzické osoby do výkonu 2 kW
	Dotace 30% na investiční náklady pro právnické osoby do výkonu 20 kW

Tabulka 4.1 – Seznam podpůrných akcí pro fotovoltaiiku

V roce 2000 byl vypracován a vládou schválen Národní program na podporu úspor a využívání obnovitelných zdrojů energie. Z nich pak jsou vyhlašovány státní programy na kratší období. V roce 2000 byl Státním fondem životního prostředí vyhlášen program Slunce do škol. Smyslem programu je umožnit mladé generaci bližší seznámení s možnostmi obnovitelných zdrojů včetně fotovoltaiky.

V období od první instalace fotovoltaického systému na základní škole v roce 2001 bylo realizováno několik desítek systémů na školách všech stupňů. Na vysokých školách v Praze a v Ostravě jsou nainstalovány dva systémy s plochou panelů 200 m² a s výkonem 20 kW. Od roku 2003 jsou Státním fondem životního prostředí poskytovány 30% dotace na instalace FVS pro privátní i právnické osoby. Pobídka k instalacím je navíc podpořena zvýšenou výkupní sazbou za dodanou elektrickou energii do sítě a to ve výši 6 Kč/kWh.

Do konce roku 2002 byly v ČR nainstalovány fotovoltaické systémy s výkonem přibližně 0,23 MW. Z toho 55 % systémů slouží pro napájení aplikací bez připojení k rozvodné síti a 45 % jsou solární systémy dodávající elektrickou energii do rozvodné sítě. V tabulce je uveden přehled nejvýznamnějších fotovoltaických systémů v ČR.

Instalace	Instalovaný výkon [kW]	Rok	Financování
Fotovoltaická elektrárna na hoře Mravenečník v Jeseníkách	10	1998	ČEZ a.s.
Fotovoltaické prodloužení fasády s barevnými solárními články na hotelu Panorama v Praze	6	2000	INCO–COPERNICUS Komise EU a MŠMT ČR
Fotovoltaická elektrárna na budově ředitelství společnosti Pražská energetika	2,55	2001	PRE, a.s.
ČVUT v Praze	5		SFŽP, program Slunce do škol
Vysoká škola báňská v Ostravě	20	2002-3	SFŽP, program Slunce do škol
Síť FV systémů na středních odborných školách po 1,2kW	36	12/2002	SFŽP, program Slunce do škol, 30 systémů
Síť FV systémů na středních odborných školách po 0,2kW	7,8	12/2002	SFŽP, program Slunce do škol, 39 systémů
Síť FV systémů na středních odborných školách po 0,1kW	3,1	12/2002	SFŽP, program Slunce do škol, 31 systémů
Matematicko-fyzikální fakulta UK v Praze	20	6/2003	SFŽP, program slunce do škol
Fotovoltaická fasáda	19,2	2004	SFŽP

Tabulka 4.2 – Přehled nejvýznamnějších fotovoltaických systémů v ČR k roku 2004

4.1 Průmysl, trh a výzkum v ČR

Fotovoltaika nepředstavuje výlučně jen energetickou technologii šetrnou ke globálnímu klimatu a pro zajištění bezpečného zdroje energie v dlouhodobém výhledu. Předpokládaný enormní nárůst objemu výroby a instalací fotovoltaických systémů s sebou přináší i významný ekonomický potenciál s pozitivními dopady pro sociální sféru.

Z hlediska ekonomických aktivit fotovoltaika představuje celý výrobně distribuční řetězec zahrnující výrobu základních výrobních materiálů – křemík, materiály pro metalizaci, speciální plynné a kapalně chemikálie, návrh a konstrukce speciálních výrobních zařízení s vysokým stupněm automatizace, výroba solárních článků a panelů, elektronický průmysl zajišťující potřebná elektronická zařízení.

Velmi důležitá základna pro ekonomické aktivity je zajišťována výzkumnou a vývojovou činností výzkumných ústavů a univerzit. V Československu publikoval první výsledky velkoplošných monokrystalických solárních článků pracovník z STU Bratislava v roce 1987. Tenkovrstvé materiály a struktury na bázi CdTe a CdS jsou dlouhou dobu předmětem vývoje na pracovišti Matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze. Technologii příprav tenkých vrstev amorfního křemíku a jejich charakterizaci se věnují dvě pracoviště

Fyzikálního ústavu AV v Praze a dvě pracoviště na MU v Brně. V Brně na VUT jsou dvě pracovní skupiny zaměřeny na diagnostiku solárních článků a měření vlastností fotovoltaických systémů.

Monokrystalický křemík jsou schopny vyrobit dvě tuzemské společnosti, nicméně jejich výrobní program je zaměřen na polovodičový průmysl. Další dvě tuzemské společnosti se zabývají řezáním křemíkových ingotů na křemíkové destičky používané pro výrobu solárních článků.

První pokusy s výrobou monokrystalických solárních článků prováděli také pracovníci Tesly Vrchlabí v letech 1991 až 1993. Dosažení konverzní účinnosti bylo však velmi nízké (8 až 11 %). V roce 1993 založila skupina pracovníků rožnovské Tesly společnost zaměřenou na výrobu solárních článků z monokrystalického křemíku.

V současné době firma vyrábí monokrystalické křemíkové solární články s vysokou konverzní účinností přeměny záření (14–16 %). V kooperaci zajišťuje výrobu všech komponent pro fotovoltaické systémy. Podstatnou část aktivit tvoří obchodní činnost (poradenství, návrh, projekce, instalace) a aplikovaný výzkum. Několik dalších menších firem se zabývá výrobou solárních panelů a elektronických zařízení pro fotovoltaické systémy.

Několik tuzemských montážních firem již získalo zkušenosti s instalacemi systémů.

4.2 Znalosti o fotovoltaike

Znalosti o současném stavu a možnostech fotovoltaiky jsou u většiny lidí velmi povrchní. Fotovoltaika, spíše tedy pojem „solární panely“, je často spojována s odlišným a neméně důležitým využitím solární energie pro ohřev vody. Téměř každý ví, že vesmírné družice jsou napájeny právě solárními panely. Většina lidí se setkala s kalkulačkou se solárními články.

S možnostmi širšího využití slunečního záření pro výrobu elektrické energie se většina lidí nesečkala. Častým argumentem je tvrzení, že energie máme dostatek a nestabilní a zatím drahou elektřinu ze Slunce nepotřebujeme. Problematika rozvoje budoucí podoby energetického systému založeného na obnovitelných zdrojích je zatím pro většinu lidí nezajímavá. Na druhou stranu je možné uvést, že v průběhu několika posledních let bylo vykonáno nebo probíhá několik zajímavých akcí a aktivit, které mají významný vliv na informovanost o fotovoltaike:

- ▶ Informační kampaně neziskových organizací – např. Greenpeace, Solar Tour 98.
- ▶ Program SFŽP – Slunce do škol – seznámení mladé generace s možnostmi využití sluneční energie.
- ▶ Na stránkách denního tisku a časopisů se stále častěji objevují příspěvky s problematikou fotovoltaiky.
- ▶ Popularizaci fotovoltaiky se věnovalo i několik málo pořadů České televize.
- ▶ Důležitou příležitostí ke zviditelnění fotovoltaiky byly různé odborné výstavy, semináře a konference.
- ▶ Na některých vysokých školách technického zaměření jsou studentům nabízeny předměty zabývající se obnovitelnými zdroji včetně fotovoltaiky – ČVUT v Praze, VUT v Brně, VŠB v Ostravě a TU v Liberci.
- ▶ Velmi atraktivní formou popularizace fotovoltaiky je každoroční soutěž modelů solárních vozítek – Napájení Sluncem, pořádaná na VŠB v Ostravě. Soutěž je určena zvláště pro středoškolské studenty (www.napajenisluncem.cz).

4.3 Energetická politika v EU

Evropská unie zcela jasně definovala svůj postoj k obnovitelným zdrojům ve vztahu k energetické a environmentální politice.

V oblasti energií preferuje udržitelnost, stabilitu energetických zdrojů, jistotu a bezpečnost zásobování energiemi a konečně zohlednění budoucích energetických potřeb rozvojových zemí. Důraz je dále kladen na efektivní využívání energií, na upřednostňování obnovitelných zdrojů a na hledání potenciálu jaderných technologií. V Bílé knize je stanoven cíl zdvojnásobit podíl obnovitelných zdrojů (OZE) na výrobě elektrické energie do roku 2010 proti roku 1995 z 6 na 12 %. Pro jednotlivé OZE jsou pak stanoveny samostatné cíle takto:

Rok	Instalovaný výkon elektrické energie [GW]		
	Biomasa	Větrná energie	Fotovoltaika
2010	230	80	3
1995	23	4	0.03

Tabulka 4.3 – Instalovaný výkon obnovitelných zdrojů energie v roce 1995 a v roce 2010

Hlavním dokumentem pro dosažení těchto cílů je Směrnice 2001/77/EC z 27. 10. 2001 – Podpora výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů na vnitřním trhu s elektřinou. Směrnice předepisuje jednotlivým členským zemím cíle, upravuje přístup k rozvodné síti a předepisuje dvouleté období pro vyhodnocení rozvoje fotovoltaiky v

jednotlivých zemích. Evropská komise také definuje základní strategii pro evropský fotovoltaický průmysl. Strategie se zaměřuje na zajištění dostatečného množství levného křemíku pro solární články, na urychlenou industrializaci tenkovrstvé technologie a konečně je nutné intenzivně rozvíjet další alternativní technologie pro období po roku 2010. Cena 2,5 €/W pro fotovoltaický systém se uvádí jako cílová hodnota pro rok 2010. Preferovat se budou fotovoltaické systémy přímo integrované do budov a zvláště pak systémy s výkony řádově MW. Důraz bude kladen na vytvoření dostatečných výrobních kapacit a zdrojů.

Jak již bylo zmíněno, 80 % produkce solárních panelů spočívá na technologiích krystalického křemíku. Množství křemíku potřebného pro celosvětovou roční produkci solárních článků rok od roku roste. Doposud byl výchozí surovinou pro výrobu solárních článků odpadový křemík z polovodičového průmyslu. Jeho množství může být nestabilní, neboť silně závisí na stavu trhu s polovodiči a navíc předpokládané potřeby fotovoltaického průmyslu v blízké době převyší dostupné množství odpadového křemíku. Tato skutečnost je předpokládána již delší dobu a je věnováno dostatečné úsilí průmyslu, výzkumu a zástupců politické reprezentace na zajištění dostatečných zdrojů levného křemíku pro fotovoltaiku.

V politické oblasti bude věnována pozornost podpoře udržitelnosti v dopravě, zemědělství a energetice. Jako důležité opatření se jeví zavedení směrnic pro integraci udržitelných technologií v budovách. V roce 2006 budou na základě vývoje stanoveny pobídkové nástroje pro případné investory nových fotovoltaických instalací.

Pro dosažení alespoň 10% podílu na celkové výrobě elektrické energie bude nutný kontinuální růst po 3. desetiletí s rychlostí 10× za dekádu.

4.4 Předpoklady rozvoje v ČR

Budoucí obraz stavu fotovoltaiky v horizontu let 2010 a dále závisí a bude záviset na mnoha faktorech, které se vzájemně ovlivňují. Na základě vývoje jednotlivých faktorů a podmínek, které budou vytvořeny, lze stanovit pravděpodobné scénáře vývoje. Předně je však potřeba definovat stávající počáteční podmínky, z kterých je možné vycházet a samozřejmě také okrajové meze, které nám vymezují možnosti dalšího vývoje.

Dostatek kvalitní a levné energie je chápán jako základ ekonomického, společenského a kulturního rozvoje každé společnosti. S masivním využíváním stávajících zdrojů energie se začíná objevovat i požadavek na čistotu a bezpečnost zdrojů. Jednotlivým druhům primárních energií přináležejí vlastnosti, které určují jejich

případnou úspěšnost. Pro jednotlivé vlády představuje energetika klíčové odvětví ekonomiky a proto věnují patřičnou pozornost dalšímu vývoji. Koncovými uživateli energií jsou však jednotlivci a tak i celá společnost, jejíž chování, motivované hodnotovými prioritami, určuje podobu energetiky. Do úvah také velmi silně vstupuje vývoj moderních technologií, které nabízejí jednak zvýšení efektivnosti využívání energie a také přicházejí s celou řadou nových způsobů získání energie. Nezastupitelnou roli má na tomto procesu věda a výzkum, které přicházejí s novými řešeními. Silný průmysl vlastní technologické a finanční prostředky na ovlivnění vývoje v energetice.

4.4.1 Charakteristika slunečního záření v ČR

Na povrch území České republiky dopadá sluneční záření s průměrnou intenzitou 800 W/m^2 v závislosti na lokalitě a klimatických podmínkách. Ročně tak dopadne na naše území energie $1000\text{--}1250 \text{ kWh/m}^2$.

Sluneční energie je dostupná kdekoli na Zemi. Díky tomu a také vlivem relativně malé energetické hustoty je fotovoltaika předurčena spíše pro výrobu elektřiny v decentralizovaných zdrojích. Navíc umožňuje výrobu elektrické energie přímo v místě spotřeby a to i bez nutnosti připojení k rozvodné síti. V našich podmínkách je fotovoltaický systém s výkonem 1 kW schopen vyprodukovat $900\text{--}1000 \text{ kWh}$ elektrické energie za rok.

4.4.2 Odhad teoretického potenciálu FV v ČR

Pro stanovení teoretického potenciálu fotovoltaiky v ČR můžeme vycházet z předpokladu, že jediným omezením je dostatek vhodné plochy pro instalaci solárních panelů. Nehledě na technologii výroby panelů, která bude v uvažovaném časovém horizontu dominantní, bude se vždy jednat o zařízení s velkou zachytnou plochou. Dále můžeme do úvah zahrnout zlepšování parametrů solárních panelů, což se promítne v rostoucím výkonu resp. rostoucím energetickém zisku z jednotky plochy.

V podmínkách ČR se uvažuje z 90% se systémy připojenými k rozvodné síti vzhledem k vysoké hustotě pokrytí. Solární panely mohou být součástí vhodně orientovaných střech a fasád všech možných typů budov – rodinné a bytové domy, školy, úřady, knihovny, výrobní a správní budovy obchodních a průmyslových společností, banky, veletržní haly...

Pro instalaci panelů je možné využít i protihlukové bariéry podél dálnic a železnic, volné jinak nevyužité plochy průmyslových areálů, střešní konstrukce nástupišť

vlakových a autobusových nádraží a stanic, zastřešená parkoviště, sportovní zařízení. Jak dokumentují četné příklady ze zahraničí, je podoba budovy mnohdy přizpůsobena velmi kreativně instalaci solárních panelů.

Ideální umístění panelů je s orientací na jihojihozápad se sklonem 45° vzhledem k vodorovné rovině pro celoroční provoz. Nicméně je možné vzhledem k místním podmínkám orientovat solární panely od jihovýchodu k jihozápadu a sklon je možné volit od polohy vodorovné až po svislou. Pro zvýšení energetického zisku je možné aplikovat natáčecí systémy, které mění orientaci a případně i sklon panelů v závislosti na poloze Slunce. Zvýšeného energetického zisku je možné dosáhnout i použitím solárních panelů s aktivní plochou na obou stranách. K těmto účelům se dají využít i různé odrazné plochy zvyšující sběr slunečního záření při zachování aktivní plochy (Poulek a spol.).

V následující tabulce je proveden odhad vhodných ploch pro instalaci solárních panelů. Základní propočet výkonu je stanoven pro solární panely se současnými parametry – 120 W/m^2 . V posledním sloupci jsou uvedeny roční energetické zisky.

	Stav k r. 2001	Instalovaný výkon (účinnost 15%)	Roční suma energie (účinnost 15%)
	Počet	GW	TWh
Obytné budovy	1 969 568	20	20
Školy	13 195	0.4	0.4
Veřejné budovy	10 000	0.9	0.9
Komerční budovy	10 000	1.2	1.2
Prům. budovy	8 000	0.8	0.8
Ostatní		1	1
Celkem		24.3	24.3

Tabulka 4.4 – Odhad vhodných ploch pro instalaci solárních panelů

V případě použití solárních panelů se solárními články s účinností 25 % by při stejné ploše byl instalovaný výkon všech FV systémů až 40,5 GW a ročně by pak vyrobily okolo 40,5 TWh elektrické energie. Tento propočet zahrnuje pouze fotovoltaické systémy na stávajících budovách s minimálními úpravami. Skutečná hodnota s využitím všech možností by mohla být daleko vyšší.

Z uvedeného vyplývá, že největší potenciál spočívá v instalacích fotovoltaických systémů na obytných budovách. V případě rodinných domů bylo počítáno s FV systémy o výkonu 5 kW nainstalovaných na 70 % všech RD.

4.4.3 Předpokládaný vývoj do roku 2010 v ČR

Jak již bylo uvedeno, EU si stanovila cíl pro instalovaný výkon fotovoltaických systémů do roku 2010 na úroveň 3 GW. Při započítání poměru počtu obyvatel v EU a v ČR získáme referenční cíl České Republiky pro rok 2010. Celkový instalovaný výkon by měl dosahovat hodnoty 84 MW. Podle evropského cíle pro rok 2020, by pak v ČR měly být v provozu fotovoltaické systémy s celkovým výkonem 541 MW.

(Informace jsou převzaty z analýzy současného stavu obnovitelných zdrojů energie v ČR zpracované kolektivem autorů, firmy ČEZ uvedené na www.cez.cz)

5 Fotovoltaické články

V úvodu byla krátce popsána funkce Slunce. Ze Slunce lze získávat energii ve dvou základních podobách. Jako energii elektrickou nebo jako energii tepelnou. V potaz nebereme přidružené duhy energie, jakým je například vítr, který by bez působení slunečních paprsků na povrch Země neexistoval a tím ji nerovnoměrně ohříval. V této práci se budeme zabývat pouze získáváním elektrické energie ze Slunce. Elektrická energie se ze Slunce získává za pomoci fotoefektu.

Fotovoltaický jev, který je využíván fotovoltaickými články, umožňuje přeměnu světelné energie na energii elektrickou. Je znám již od roku 1839 (objevil jej Antonie Besquel) a v poslední době, kdy technologie výroby polovodičů seznala velkého pokroku, se jej hojně využívá (hlavně pro fotovoltaické články). Jako první byl objeven vnitřní fotoefekt a používal se u elektronek s oxidem měďným a později se selenem s účinností pod 1%. V roce 1888 objevil Hallwachs vnější fotoefekt. V dnešní době existuje celá řada fotovoltaických článků, z nichž první byl vyroben v Bell Telephone Laboratory, USA v roce 1954 a měl účinnost 6%. V současné době se nejčastěji používají křemíkové články. V následující tabulce jsou uvedeny druhy základních křemíkových fotovoltaických článků s jejich účinnostmi a procentuální zastoupením ve výrobě.

Typ článku	Účinnost v laboratoři [%]	Účinnost v provozu [%]	Vyráběno [%]
mono-krystal (c-Si)	24,4	17	35
multi-krystal (mc-Si)	19,8	14	33
amorfni (a-Si)	13,2	7	29

Tabulka 5.1 – Druhy základních křemíkových fotovoltaických článků

Pod pojmem krystalický si můžeme představit, že atomy křemíku jsou uspořádány v rovnoměrných vzdálenostech od sebe a tvoří mřížku.

Typy krystalických křemíků :

- Monokrystalický – má perfektní stavbu, je bez defektů a bez krystalických chyb
- Multi-krystalický – má perfektní uspořádání jen v jednotlivých částech, přibližně 1cm velkých zrn
- Amorfni – nemají žádné uspořádání atomů a jsou naprosto nerovnoměrně rozloženy

Křemíkové články nejsou jediné, které se běžně používají, dále se používají :

- Vícevrstvé fotovoltaické články
- S antireflexní vrstvou

- S více PN přechody
- S koncentrací paprsků

a mnoho dalších.

5.1 Fotoefekt

Fotovoltaický jev existuje ve třech variantách:

- Chemický fotoefekt
- Vnější fotoefekt
- Vnitřní fotoefekt

Chemický fotoefekt můžeme pozorovat například zčernáním stříbrobromidové vrstvy při ozáření světlem. Fotoreakce nastává dělením stříbrobromidových molekul na atomy stříbra a bromu.

Vnější fotoefekt lze vysvětlit například při uvolňování elektronů z povrchu kalia (kovu při ozáření světlem). Fotoreakce nastává přenosem fotonů s určitou energií na elektron kalia.

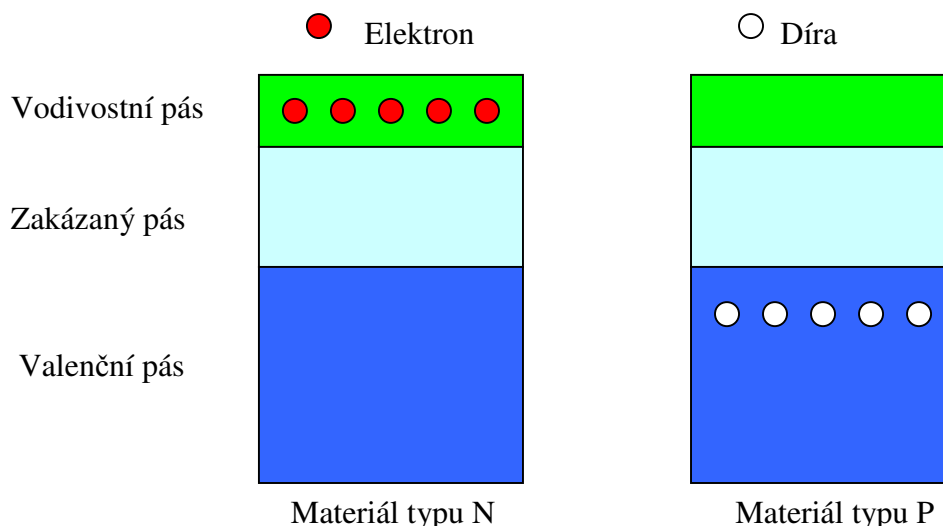
Vnitřní fotoefekt lze pozorovat například zvýšením elektrické vodivosti polovodiče při ozáření světlem. Fotoreakce nastává přenosem fotonů s určitou energií na elektrony polovodiče.

5.2 Struktura fotovoltaických článků

Elektrony obsažené v prvcích se mohou na určitých hladinách udržovat jen za určitých stavů energie. Polovodičové materiály jsou v tomto ohledu velice význačné, neboť poskytují elektronům k udržení dvě energetická pásma: valenční a vodivostní.

Při absorpci fotonu P-N přechodem, předá foton svou kinetickou energii elektronu a tím se energie elektronu zvýší. Foton přitom zanikne a elektron se přesune z valenčního pásma do vodivostního pásma. V tomto pásmu se již může volně pohybovat. Pokud je elektron ve vodivostním pásmu, je k dispozici procházejícímu proudu. Pokud s elektronem nebudeme nijak dál zacházet, po určité době zpět rekombinuje do valenčního pásma.

Vrstva N (P-N přechodu) má přebytek elektronů. Nejčastěji je tvořena difuzí fosforu P (5 elektronů) do křemíkové destičky Si (4 elektrony). Vrstva P má přebytek děr (nedostatek elektronů). Nejčastěji je tvořena difuzí bóru B (3 elektrony) do křemíkové destičky Si (4 elektrony). (Olehla, P.)



Obrázek 5.1 – Struktura polovodičů

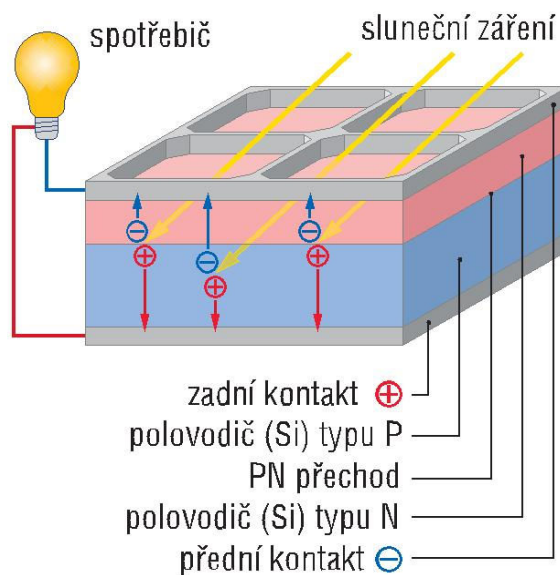
5.3 Princip fotovoltaických článků

Fotovoltaický článek je tvořen polovodičovým přechodem P-N, jehož vrstva N je vystavena působení světla. Světlo ve formě fotonů vniká do fotovoltaického článku (na P-N přechod) a tam je absorbováno. Kinetická energie fotonu je předána elektronu. Přechod P-N je tvořen těsným přiložením dvou oblastí P a N vedle sebe. Protože není v lidských silách přiložit dvě základní křemíkové (nebo jiné) destičky k sobě, aniž by tam vznikla mezera, používá se pouze jedna základní destička, která je rozdělena na dvě části (P a N). Každá z těchto částí má difundovaný jiný prvek. Celková mocnost fotovoltaického článku je asi 300 μ m, z toho N-vrstva je obvykle menší než 1 μ m.

Amorfní křemíkové fotovoltaické články na rozdíl od krystalického křemíku nebo multi krystalického křemíku fotovoltaických článků mají asi 40 krát větší absorpci světla. Proto jsou požadovány jen velmi tenké vrstvy. Pohyb elektronů je ale mnohem menší než v krystalech. Další problém je jejich degradace, protože změna výkonu se ustálí až po 100 až 1000 hodinách provozu. Využívají se především u malých spotřebičů, například kapesní kalkulačky nebo hodinky. Vrstvy amorfního křemíku se užívají také pro LCD obrazovky u počítačů. Do této skupiny patří i tenkovrstvé polovodičové fotovoltaické články. Velikou výhodou těchto článků je menší hmotnost a velmi dobrá ohebnost. Nevýhodou je však nižší účinnost a snadná degradace.

V roce 1991 navrhl Furoe nový solární článek (levný a vysoce účinný), který na rozdíl od fotovoltaického efektu využívá principu elektrolýzy. Absorbér je složen z monomolekulární barevné vrstvy vysoko porézního oxidu titaničitého, TiO₂. Tyto

solární články jsou netečné k defektům a cizím látkám, neboť proud je veden elektrony v absorberu typu TiO_2 . (www.shell.com)



Obrázek 5.2 – Princip fotovoltaické přeměny

Ve fotovoltaickém článku směřují elektrony ke straně polovodiče typu N a díry ke straně typu P. Na přední straně fotovoltaického článku je kovový kontakt se záporným pólem a na zadní straně je kladný pól. Tímto je vynuceno procházení PN přechodem, je tím snížena pravděpodobnost rekombinace a tím ztráta elektronů proudících k zápornému pólu. Přes spotřebič je proudový okruh uzavřen a elektrony se vrací zpět do fotovoltaického článku (Obrázek 5.2).

Kovový kontakt na přední straně by měl být co nejmenší, aby bylo zabráněno stínění dopadajících slunečních paprsků. Současně však musí zaručovat dostatečnou elektrickou vodivost pro článek.

Materál	šířka zakázaného pásma [eV]	teoretická účinnost [%]
Si	1,09	20
Ge	0,75	10,2
Ga As	1,4	23,4
Cd Se	1,72	24,2
Cd Te	1,5	24
In P	1,28	22,3

Tabulka 5.2 – Teoretická účinnost fotovoltaických článků

Materiál	Struktura	Typ	Max. účinnost [%]
Si	mono	p-n	24,3
Si	mono	MIS	18
Si	poly	p-n	17,3
Si	mono-pás	p-n	15,4
Si (a-Si:H)	tenkovrstvý	p-n	12,7
Ga As	mono	p-n	24,2
Ga Al As/Ga As	monohetero-	p-n	25,1
Ga As	tenkovrstvý	MIS	7,5
Cd S / Cu S	tenkovrstvý	hetero - p-n	10
In P / Cd S	monohetero-	p-n	14
In P / Cd S	tenkovrstvý	hetero - p-n	9,4
Cu In Se / Cd S	mono	hetero - p-n	17,7
Cu In Se / Cd S	tenkovrstvý	hetero - p-n	11,5

Tabulka 5.3 – Přehled nejdůležitějších polovodičových materiálů (Olehla, P.)

MIS – označuje kov-polovodič, který má vloženou tenkou izolační vrstvu (2-4 nm) mezi kov a polovodič (MIS = Metal Isolator Semiconductor)

Hetero- p-n – označuje polovodič-polovodič, který může být zhotoven velice levně, například napařováním, nástřikem nebo chemicky. Určitou dobu po výrobě však klesá výkon, což je velkou nevýhodou.

Tým vedený Tedem Sargentem z Univerzity v Torontu učinil první krok k důležitému technologickému průlomu v oblasti výroby nových perspektivních typů fotovoltaických článků. Nová technologie umožňuje výrobu nastříkávaných fotovoltaických článků, které mohou být aplikovány v nejširším spektru.

Nová hmota obsahuje nanotechnologické prvky, které jsou schopny přeměňovat tepelné infračervené paprsky. Hmotu lze nastříkat na libovolný povrch, který se tak může stát zdrojem čistého, ekologicky získávaného proudu. Vědci počítají s tím, že nový materiál bude moci dosáhnout účinnosti až 30 % ve srovnání s dnešními 6 % obdobných typů.

Nový materiál bude moci být například integrován do vláken svetrů, který se tak stane zdrojem elektřiny například pro mobilní telefon. Velké aplikace umožní jednoduchá integrace fotovoltaiky do stavebních struktur. (www.eurosolar.cz)

5.4 Konstrukce solárních článků

Při konstrukci solárních článků převládá snaha ušetřit materiál a omezit optické a elektrické ztráty. K optickým ztrátám dochází následkem odrazu a neúplné absorpce záření. Průměrný činitel odrazu polovodičů je pro záření ve viditelném spektru poměrně veliký (pro křemík přesahuje 30%), z toho důvodu se používají různé antireflexní vrstvy, které sníží tuto odrazivost pod 10%. Materiály použité pro antireflexní vrstvy mohou být buď anorganické (SiO_2 , Al_2O_3 , SiO , Si_3N_4 , TiO_2 , ZnS), nebo organické (na bázi polyamidů – obchodní názvy Kapton, Mylar, Aclar).

Jinou možností, jak snížit činitel odrazu, je vytvoření tzv. texturového povrchu. Použitím selektivního leptadla lze na povrchu vzorku vytvořit malé pyramidy, které jsou otočeny špičkou dolů. Světlo po dopadu na takto upravený povrch je zčásti odraženo směrem dolů a dostává tak další možnost proniknout do článku.

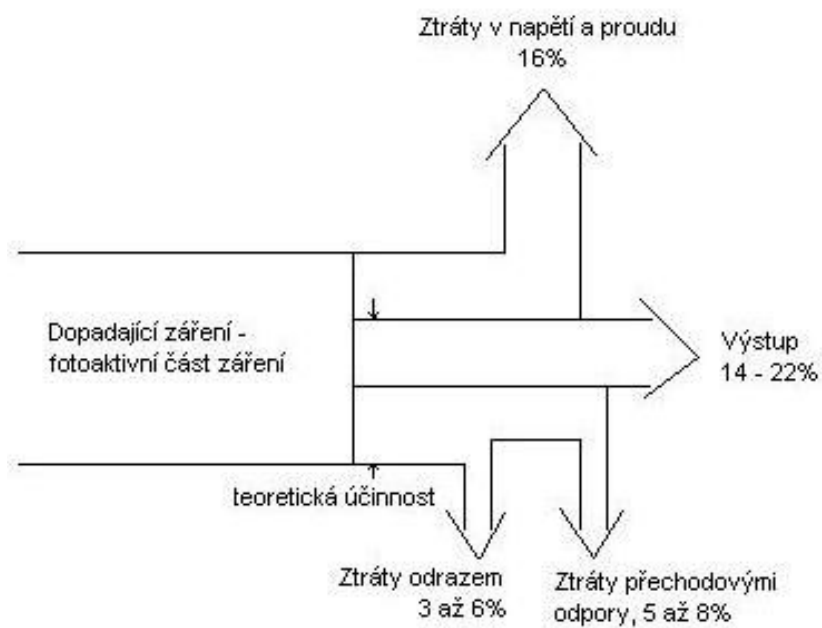
Další evoluce křemíkových solárních článků souvisí s pasivovým editorem (PESC). Při této metodě je využívána technika laserového žlábkování a uložených kontaktů. U článků o ploše 12 cm^2 bylo dosaženo přeměny energie 19,7 až 20,4% a při ploše 49 cm^2 byla tato účinnost 19,6%.

Nejnovější fotovoltaická struktura křemíkových solárních článků s vysokou účinností je tzv. struktura PERC. Zcela novým prvkem v konstrukci křemíkových solárních článků, vedoucím k podstatnému zvýšení účinnosti přeměny, je zabudování lokální defektní vrstvy nad přechodem PN mezi dopované vrstvy P^+ a N^+ (viz. Obrázek 5.4).

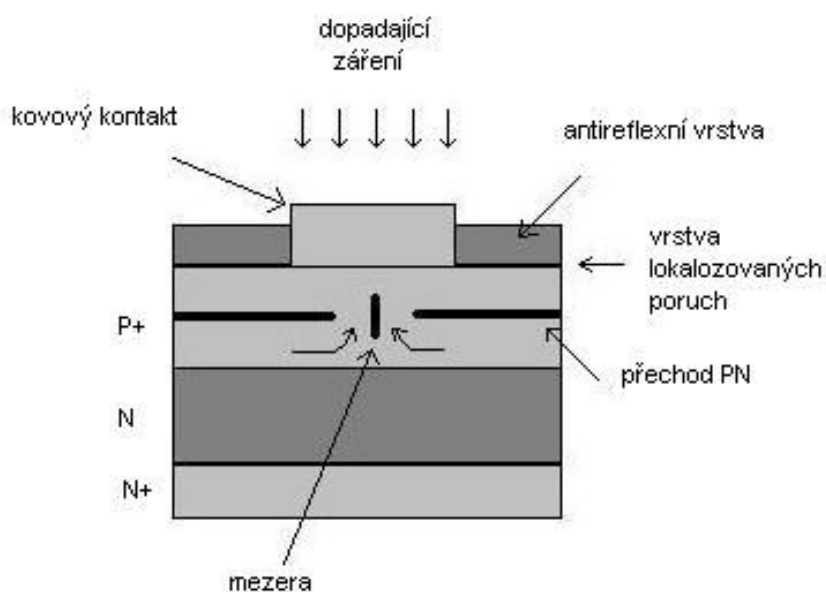
Na zvýšení účinnosti se podílejí následující dva jevy:

- Vlastní přítomnost defektní vrstvy
- Umístění díry v této vrstvě pod vrchní kontakt

Neporušený křemíkový materiál v díře má menší odpor než materiál v oblasti mimo defektní díru, nosiče náboje preferují pohyb přes PN přechod právě touto dírou. Tím se snižují ztráty způsobené rekombinací a následně se zvyšuje účinnost, která může dosáhnout až 35%. (Kolektiv autorů, 2001)



Obrázek 5.3 – Vliv ztrát na celkovou účinnost solárního fotovoltaického článku



Obrázek 5.4 – Solární článek s lokalizovanou vrstvou poruch

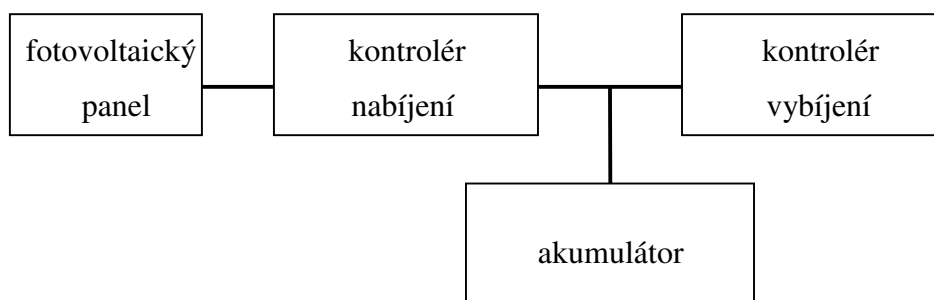
5.5 Rozdělení fotovoltaických systémů

Fotovoltaické systémy můžeme z hlediska aplikace rozdělit na autonomní, hybridní a přímo připojené k síti.

- **Autonomní systémy**

Tento systém potřebuje akumulátory jako zásobníky získané elektrické energie.

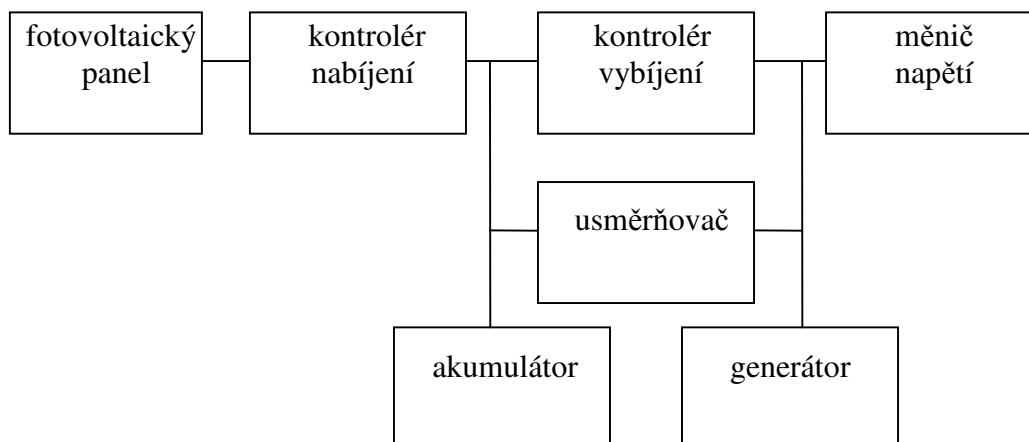
Většinou se používá v místech, kde není dostupná rozvodná síť – tzv. ostrovní systémy.



Obrázek 5.5 – Schéma autonomního systému

- **Hybridní systémy**

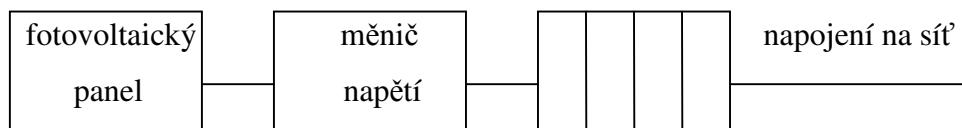
Tento systém obsahuje jednak fotovoltaické pole jako autonomní systém, avšak je k němu zapojeno několik pomocných generátorů, například dieselgenerátory nebo větrné elektrárny a jednu nebo více baterií. Vyžaduje složitější regulátory a řídicí členy, které optimalizují využití všech zdrojů.



Obrázek 5.6 – Schéma hybridního systému

- **Systém přímo spojený se sítí**

Uvedený spolu generující systém. Běžně nepotřebuje ke svému chodu akumulátor. Měnič napětí na 230VAC musí být navržen tak, aby pracoval v celém rozsahu napětí, jenž poskytuje fotovoltaický panel.



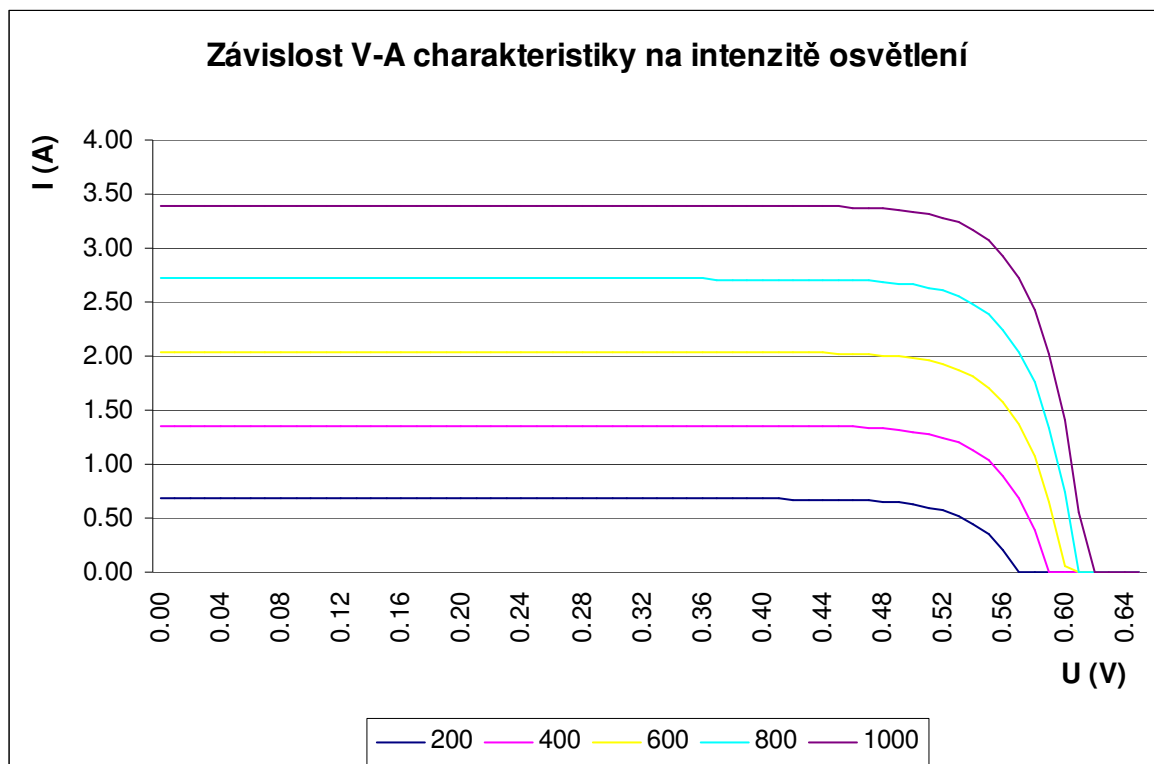
Obrázek 5.7 – Schéma systému přímo připojeného do sítě

5.6 Závislosti fotovoltaického článku na teplotě a osvětlení

Každý fotovoltaický článek má při měnících se povětrnostních podmínkách různé výkony, které ovlivňují některé meteorologické faktory, jako je intenzita osvětlení, teplota a také zašpinění aktivní plochy fotovoltaického panelu. Proto je nutné panel čas od času vyčistit, hlavně pokud jsou na něm například listy. Ty pak působí jako stínění a panel nemůže dodávat takový výkon, jaký by měl.

Pokud roste teplota fotovoltaického článku, difusní napětí na PN přechodu klesá, čímž se sníží napětí naprázdno. S rostoucí teplotou prudce klesá napětí naprázdno a proud na krátko mírně roste. To vede ke snížení výkonu fotovoltaického článku a tedy i posunu MPP (Maximal Power Point – bod maximálního výkonu).

Pokud se jedná o intenzitu osvětlení, tak při snížení osvětlení proud dodávaný panelem rapidně klesá a stejně jako napětí (Obrázek 5.8). Celkově se tedy posouvá bod maximálního výkonu MPP a musí být dodatečně nastaven do správné polohy pomocí MPP Trackeru (viz. kapitola 9 - Nastavení bodu MPP).



Obrázek 5.8 – Ukázka V-A charakteristiky teoretického fotovoltaického článku v závislosti na intenzitě osvětlení od 1000 Wm^{-2} do 200 Wm^{-2} , při konstantní teplotě.

5.7 Náhradní schéma fotovoltaického článku

Náhradní schéma je vlastně modelem skutečného fotovoltaického článku a umožňuje výpočet hodnot, které není možné získat měřením, nebo jsou měřitelné jen ve speciální laboratoři.

V-A charakteristika pro osvětlený ideální fotovoltaický článek je dána Schockleyovou rovnicí pro ideální diodu.

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \text{ [A]} \quad (5.1)$$

U_T – teplotní napětí

$$U_T = \frac{k \cdot T}{e} \text{ [V]} \quad (5.2)$$

T – termodynamická teplota [K]

k – Boltzmanova konstanta [J] ($k=1,38e^{-23}$ J)

e – elementární náboj [C] ($e=1,60217654e^{-19}$ C)

Pro 25°C vychází teplotní napětí na 0,025V.

I_0 – saturační proud

$$I_0 = e \cdot A \cdot \left(\frac{D_N}{L_N} \cdot \frac{1}{N_A} + \frac{D_P}{L_P} \cdot \frac{1}{N_D} \right) \cdot n_i^2 \text{ [A]} \quad (5.3)$$

A – plocha přechodu

N_A – koncentrace akceptorů

N_D – koncentrace donorů

n_i – vlastní koncentrace vodičů náboje

D_n, D_p – difusní koncentrace nosičů resp. děr

L_p, L_n – střední difusní délka elektronů resp. děr

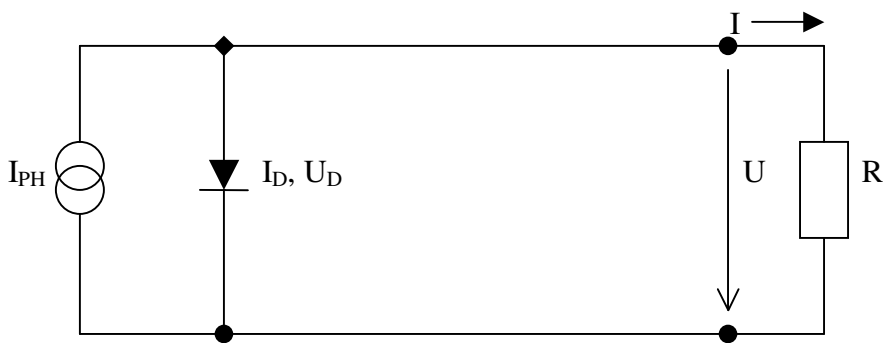
(Kasap, 2001)

Na osvětleném ideálním fotovoltaickém článku zapojeném se spotřebičem je měřen zátěžový proud .

$$I = I_{PH} - I_D \text{ [A]} \quad (5.4)$$

Pro náhradní schémata fotovoltaického článku se používají následující modely (Bulletin, Wild, 1996),(Shapiro, Tkachenko ,1990),(Quaschining, Hanitsch, 1998) (Khouzam, Hoffman, 1990),(Wagner, 1999):

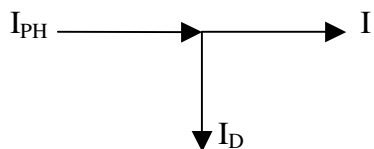
Model 1 : Nízká kvalita aproximace modelu



Obrázek 5.9 – Náhradní schéma ideálního modelu

Odvození dle autora:

V odvození vycházíme z Schockleyovy rovnice $I_D = I_0 \cdot (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$



$$I = I_{PH} - I_D$$

$$I = I_{PH} - I_0 \cdot (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \text{ [A]} \quad (5.5)$$

Z rovnice pro proud vyjádříme napětí.

$$\frac{I_{PH} - I}{I_0} = e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1$$

$$\frac{I_{PH} - I + I_0}{I_0} = e^{\frac{U_D}{U_T}}$$

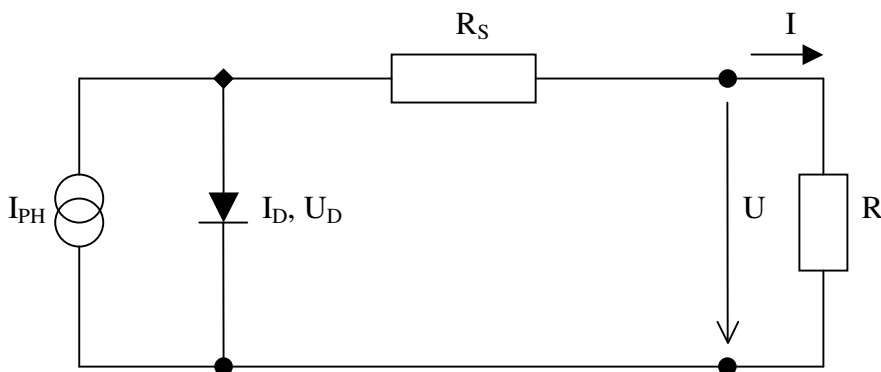
$$\ln\left(\frac{I_{PH} - I + I_0}{I_0}\right) = \frac{U_D}{U_T}$$

$$U_D = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{PH} - I + I_0}{I_0}\right)$$

$$U_D = U$$

$$U = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{PH} - I + I_0}{I_0}\right) \text{ [V]} \quad (5.6)$$

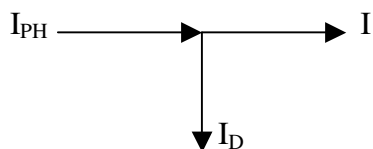
Model 2 : Dobrá aproximace modelu, ale hodnota R_S může být záporná



Obrázek 5.10 – Náhradní schéma standardního modelu

Odvození dle autora:

V odvození vycházíme z Schockleyovy rovnice $I_D = I_0 \cdot (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$



$$I = I_{PH} - I_D$$

$$I = I_{PH} - I_0 \cdot (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \text{ [A]} \quad (5.7)$$

Napětí na výstupu je rovno napětí na diodě zmenšené o napětí na sériovém odporu.

$$U = U_D - R_S \cdot I$$

Napětí na diodě určíme z rovnice pro proud.

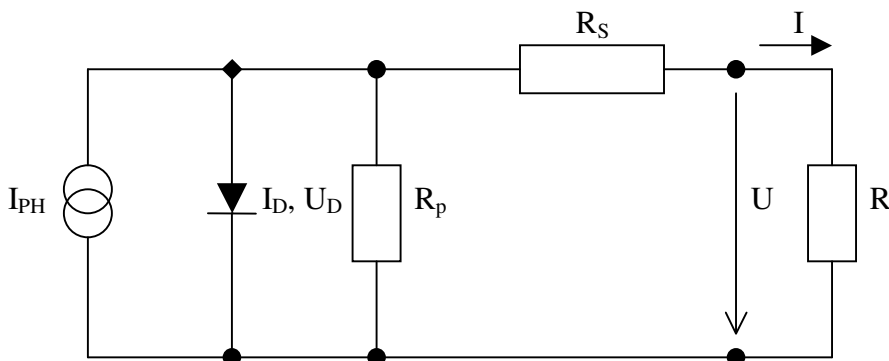
$$I - I_{PH} = I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right)$$

$$\ln \left(\frac{I_{PH} - I - I_0}{I_0} \right) = \frac{U_D}{U_T}$$

$$U_D = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_{PH} - I - I_0}{I_0} \right)$$

$$U = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_{PH} - I - I_0}{I_0} \right) - R_S \cdot I \text{ [A]} \quad (5.8)$$

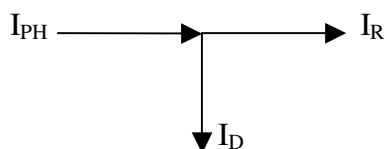
Model 3 : Dobrá aproximační kvalita modelu, ale pro U je explicitní řešení neznámé



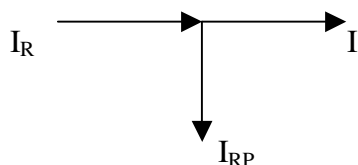
Obrázek 5.11 – Náhradní schéma standardního modelu

Odvození dle autora:

V odvození vycházíme z Schockleyovy rovnice $I_D = I_0 \cdot (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$



$$I_R = I_{PH} - I_D$$



$$I = I_R - I_{RP}$$

$$I = I_{PH} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) - I_{RP}$$

I_{RP} vypočteme z odporu a napětí na něm, kde toto napětí je výstupní napětí zvětšeno o úbytek na sériovém odporu.

$$I_{RP} = \frac{U + I \cdot R_s}{R_p}$$

$$I = I_{PH} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p}$$

Pro vyjádření napětí na diodě U_D použijeme výstupní napětí zvětšené o úbytek napětí na sériovém odporu.

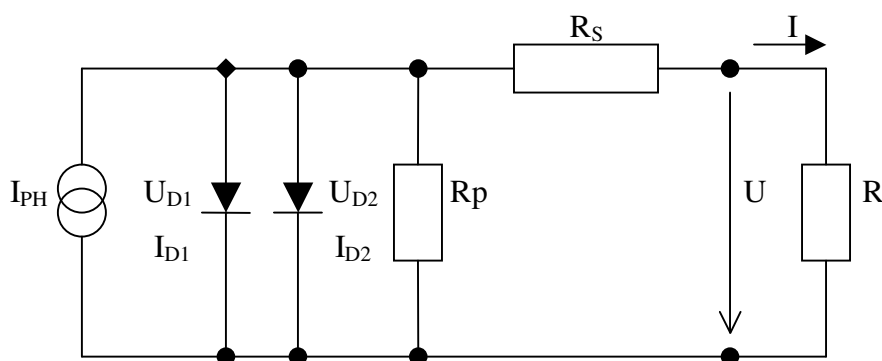
$$U_D = U + U_{Rs}$$

$$U = U + I \cdot R_S$$

$$I = I_{PH} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{(U+I \cdot R_S)}{U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P} \quad [\text{A}] \quad (5.9)$$

Z odvození výstupního proudu v tomto modelu je vidět, že explicitní vyjádření napětí není možné a tudíž pro jeho zjištění bude nutné použít jednu z iteračních metod.

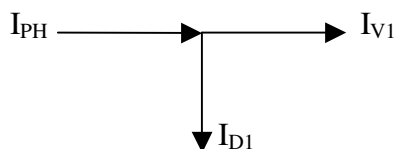
Model 4 : Velmi dobrá aproximační kvalita modelu, pro U je explicitní řešení neznámé



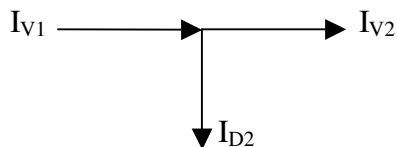
Obrázek 5.12 – Náhradní schéma modelu se dvěma diodami

Odvození dle autora:

V odvození vycházíme z Schockleyovy rovnice $I_D = I_0 \cdot (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$



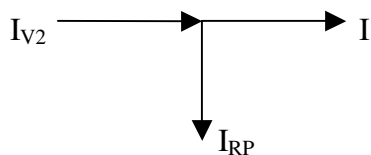
$$I_{V1} = I_{PH} - I_{D1}$$



$$I_{V2} = I_{V1} - I_{D2}$$

$$I_{V2} = I_{PH} - I_{D1} - I_{D2}$$

$$I_{V2} = I_{PH} - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{U_{D1}}{U_T}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left(e^{\frac{U_{D2}}{U_T}} - 1 \right)$$



$$I = I_{V2} - I_{RP}$$

I_{RP} vypočteme z odporu a napětí na něm, kde toto napětí je výstupní napětí zvětšeno o úbytek na sériovém odporu.

$$I_{RP} = \frac{U + I \cdot R_S}{R_P}$$

$$I = I_{V2} - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P}$$

$$I = I_{PH} - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{U_{D1}}{U_T}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left(e^{\frac{U_{D2}}{U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P}$$

Napětí na obou diodách je stejné a lze vyjádřit jako výstupní napětí zvětšené o úbytek napětí na sériovém odporu.

$$U_{D1} = U_{D2} = U + I_{Rs} \cdot R_S$$

$$I = I_{PH} - I_{01} \cdot \left(e^{\frac{(U+I \cdot R_S)}{U_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left(e^{\frac{(U+I \cdot R_S)}{U_{T2}}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P} \text{ [A]} \quad (5.10)$$

Z odvození výstupního proudu v tomto modelu je vidět, že explicitní vyjádření napětí není možné a tudíž pro jeho zjištění bude nutné použít jednu z iteračních metod.

Vysvětlivky :

I_{PH} – proud z fotovoltaického článku

D – paralelně zapojené diody

R_S – sériově zapojený odpor (nahrazuje odpor polovodičů a kontaktů)

R_P – paralelně zapojený odpor (nahrazuje povrchové rekombinační procesy)

R – zátěžový odpor vnějšího proudového okruhu (vnější spotřebič)

- 1 Pro $U=0$ dostaneme zkratový proud I_{SC} , který je přibližně roven I_{PH}
- 2 Pro $I=0$ dostáváme napětí naprázdno U_{OC}
- 3 V místě MPP je maximální výkon P_{max}

Poznámka: pro sestavení V-A charakteristik v této práci je vždy použita výpočtová metoda pomocí modelu 2.

5.7.1 Výpočet hodnot I_{ph} , U_T , I_0 , R_{pv}

Při výpočtu parametrů pro modely fotovoltaických článků je nutné znát základní parametry panelů. Tyto parametry udává výrobce a jsou následující:

I_{sc} [A] – zkratový proud

U_{oc} [V] – napětí naprázdno

I_{Pmax} [A] – maximální proud

U_{Pmax} [V] – maximální napětí

Všechny udané hodnoty jsou platné pro standardní podmínky.

Z těchto hodnot již lze určit výpočtem maximální výkon fotovoltaického článku P_{max} v místě MPP a též charakteristické veličiny:

I_{ph} [A] – proud fotovoltaického článku

U_T [V] – teplotní napětí

I_0 [A] – uzavírací proud

R_{pv} [Ω] – fotovoltaický odpor

Pro náhradní model fotovoltaického článku – model 2 lze provést výpočet (Wagner, 1999):

$$M = \frac{U_{oc}}{I_{sc}} \left(-5.411 \cdot \frac{I_{Pmax} \cdot U_{Pmax}}{I_{sc} \cdot U_{oc}} + 6.45 \cdot \frac{U_{Pmax}}{U_{oc}} + 3.147 \cdot \frac{I_{Pmax}}{I_{sc}} \right) [\Omega] \quad (5.11)$$

$$R_{pv} = -M \cdot \frac{I_{sc}}{I_{Pmax}} + \frac{U_{Pmax}}{I_{Pmax}} \cdot \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{Pmax}} \right) [\Omega] \quad (5.12)$$

$$U_T = -(M + R_{pv}) \cdot I_{sc} [V] \quad (5.13)$$

$$I_0 = I_{sc} \cdot e^{-\frac{U_{oc}}{U_T}} [A] \quad (5.14)$$

$$I_{ph} = I_{sc} [A] \quad (5.15)$$

$$R_s = R_{pv} \text{ } [\Omega] \quad (5.16)$$

Poznámka:

Pro modely 1, 2 lze provést výpočet pomocí analytického řešení, ale modely 3 a 4 je nutno řešit pomocí nelineárních rovnic, například Simplexovou metodou uvedenou v (Olehla M., 1988), protože nelze explicitně vyjádřit napětí U . U modelů 3 a 4 je velmi důležité určit správně počáteční podmínky pro numerický výpočet.

Následující i pozdější výpočty budou prováděny s daty, které byly dodány výrobcem solárního panelu, který je použit v reálných modelech řízného natáčení.

Dané hodnoty panelu:

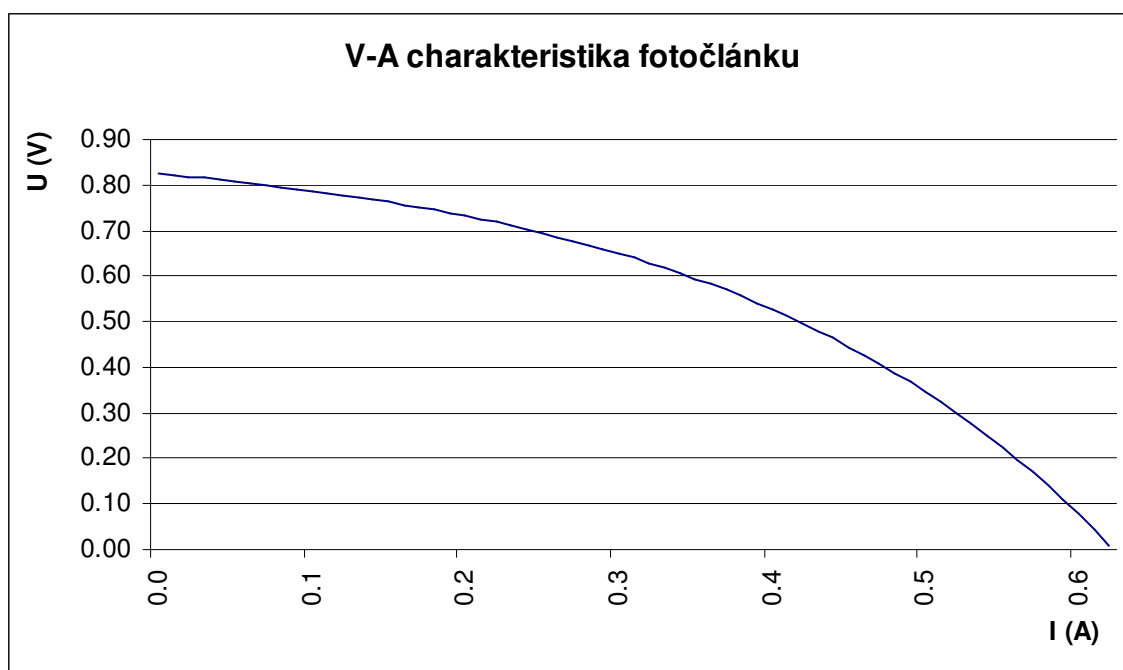
P_{\max}	26 W
U_{nom}	12 V
U_{MPP}	17,4 V
I_{MPP}	1,52 A
U_{oc}	21,6 V
I_{sc}	1,65 A

Vypočtené hodnoty panelu:

M	2,183 Ω
R_{pv}	-2,38 Ω
U_T	0,158 V
I_0	0.018 A
I_{ph}	0.825A
R_s	-2,385 Ω

Tabulka 5.4 – Hodnoty panelu udané výrobcem a vypočtené dle metody z modelu 2

Vstupní napěťové hodnoty do výpočtu byly zmenšeny 36x, protože solární panel se skládá z 36 sériově spojených článků a proud byl zmenšen 2x, protože jsou zde dvě paralelní větve.



Obrázek 5.13 – V-A charakteristika fotovoltaického článku, výpočet dle metody 2, vstupní data z Tabulka 5.1

Z předešlého grafu je vidět, že měřený a dle dodaných hodnot nasimulovaný fotovoltaický panel má příliš plochou křivku. Z tohoto lze usoudit, že fotovoltaický panel není příliš kvalitní. Křivka kvalitního fotovoltaického panelu má mnohem ostřejší sklon.

5.7.2 Výpočet vnitřního sériového a paralelního odporu

5.7.2.1 Výpočet vnitřního sériového odporu

Výpočet samotného vnitřního sériového odporu s sebou nese určité problémy. Jeho měření je velmi důležité pro kontrolu kvality fotovoltaického článku. Jeho hodnota se zvyšuje úměrně při špatných kontaktních odporech. Z tohoto měření lze tedy usoudit na stav samotného fotovoltaického článku. Při výpočtu sériového odporu při umělém světle je nutné dodržet následující podmínky:

- Musí být naměřeny dvě voltampérové charakteristiky při různé intenzitě osvětlení, přičemž hodnota osvětlení nemusí být známa, se stejným spektrálním rozložením
- Během měření musí být udržována konstantní teplota fotovoltaického článku
- Pokud je fotovoltaický článek měřen na slunečním světle, je postup totožný, různých intenzit osvětlení je dosaženo jednoduchým nakloněním fotovoltaického článku

Pro výpočet samotného R_s je nutno určit hodnoty I_{ph} , U_T , I_0 , R_{pv} pro obě intenzity záření a analytickým výpočtem určit rozdíl proudů ΔI a pracovní bod napětí U_1 a U_2 (Olehla, 2002). Výpočet charakteristických veličin fotovoltaického článku je prováděn dle vztahů z kapitoly 5.7.1.

Po změření hodnot a provedení výpočtu jsme obdržely tyto vstupní hodnoty do výpočtu:

$$I_{sc1} = 0,82 \text{ A}, I_{sc2} = 0,8 \text{ A}, U_{T1} = 0,158 \text{ V}, U_{T2} = 0,15 \text{ V}, R_{pv1} = -2,38 \text{ } \Omega, R_{pv2} = -2,2 \text{ } \Omega, I_{01} = 0,018 \text{ A}, I_{02} = 0,02 \text{ A}$$

Výpočet rozdílu proudů:

$$\Delta I = 0,5 \cdot I_{sc} = 0,5 \cdot 0,8 = 0,4 \text{ [A]} \quad (5.17)$$

Za I_{sc} dosadíme menší z hodnot zkratového proudu článku.

Výpočet pracovního bodu napětí U_1 a U_2 :

$$U = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_{ph} - I - I_0}{I_0} \right) - I \cdot R_{pv} \text{ [V]} \quad (5.18)$$

$$U_1 = 0,158 \cdot \left(\frac{0,82 - 0,42 - 0,018}{0,018} \right) + 0,42 \cdot 2,38 = 4,35 \text{ [V]}$$

$$U_2 = 0.158 \cdot \left(\frac{0.8 - 0.4 - 0.02}{0.02} \right) + 0.4 \cdot 2.2 = 3.88 \text{ [V]}$$

$$I = I_{sc} - \Delta I \text{ [A]} \quad (5.19)$$

$$I_1 = 0.82 - 0.4 = 0.42 \text{ [A]}$$

$$I_2 = 0.8 - 0.4 = 0.4 \text{ [A]}$$

Již samotný vnitřní sériový odpor se vypočte podle následujícího vztahu:

$$R_s = \frac{U_2 - U_1}{I_{sc1} - I_{sc2}} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (5.20)$$

$$R_s = \frac{3.88 - 4.35}{0.82 - 0.8} = -23.5 \text{ [}\Omega\text{]}$$

Hodnota sériového odporu R_s je záporná a jak bylo uvedeno u výpočtové metody 2, tak toto je jedna ze negativních vlastností tohoto modelu.

5.7.2.2 Výpočet vnitřního paralelního odporu

Určení hodnot odporu R_p je důležité pro kontrolu kvality fotovoltaického článku. Hodnoty R_p by se měly pohybovat kolem hodnoty $100 \cdot R_{max}$, kde R_{max} je odpor v bodě MPP. Podmínky pro měření fotovoltaického článku jsou stejné jako u sériového odporu. Pro výpočet odporu R_p potřebujeme také znát hodnoty I_{ph} , U_T , I_0 , R_{pv} pro obě ozáření a z těchto hodnot určit rozdíl proudů I_L a pracovní napětí U_1 a U_2 (Olehla, 2002).

Výpočet rozdílu proudů:

$$I_L = 0.99 \cdot I_{sc} = 0.99 \cdot 0.825 = 0.816 \text{ [A]} \quad (5.21)$$

Výpočet pracovního bodu napětí:

$$U_L = U_T \cdot \ln \left(\frac{I_{ph} - I_L - I_0}{I_0} \right) - I_L \cdot R_{pv} = 1.86 \text{ [V]} \quad (5.22)$$

Již samotný vnitřní paralelní odpor se vypočte podle následujícího vztahu:

$$R_p = \frac{U_L}{I_{sc} - I_L} = \frac{1.86}{0.825 - 0.816} = 206 \text{ [}\Omega\text{]} \quad (5.23)$$

Výpočtem lze určit také maximální hodnoty paralelního odporu:

$$R_{P_{\max}} = \frac{U}{I} = \frac{17,4}{0,76} = 22,3 \text{ } [\Omega] \quad (5.24)$$

5.8 Výpočet maximálního výkonu

Maximální výkon fotovoltaického článku v bodě MPP určíme z následujícího vztahu:

$$P_{\max} = U_{\max} \cdot I_{\max} = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \text{ } [W] \quad (5.25)$$

FF – faktor určující kvalitu fotovoltaického článku

Vysoké hodnoty FF lze dosáhnout dobrou uzavírací schopností p-n přechodu, to znamená při malých uzavíracích proudech diody I_D , malých vnitřních sériových odporech a velkých vnitřních paralelních odporech fotovoltaického článku. Hodnoty tohoto faktoru se pohybují v rozmezí 76% - 84% a záleží na charakteristice a teplotě fotovoltaického článku.

Bod maximálního výkonu závisí na dopadajícím množství sluneční energie na fotovoltaický článek a v neposlední řadě na jeho teplotě. Pro dosažení maximálního výkonu článku musí být pracovní bod průběžně regulován podle okolních podmínek.

Pro dosažení maximálního výkonu musí být zátěžový odpor roven hodnotě:

$$R_z = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} \text{ } [\Omega] \quad (5.26)$$

Z vypočtených hodnot z předchozích kapitol lze určit FF a R_z :

$$FF = \frac{P_{\max}}{U_{\max} \cdot I_{\max}} = 0,72 \text{ } [-]$$

$$R_z = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} = 13,09 \Omega$$

6 Geometrie pohybu Slunce

Pohyb Slunce určuje několik základních parametrů. Jsou to sluneční azimut a výška Slunce nad obzorem. Neméně důležitým parametrem je čas východu a západu Slunce. Pro každý den v roce jsou tyto hodnoty rozdílné. V následujících podkapitolách budou uvedeny jednotlivé výpočty a jejich odvození.

V těchto podkapitolách byly užity dva typy výpočtů. První je uváděn výpočet dle Cihelky(1994). Jako druhý je uveden odvozený vzorec dle autora.

Na podporu vztahů a výpočtů byla vytvořena webová aplikace, která zrcadlí níže uvedené vztahy. Vyobrazení jednotlivých stránek aplikace bude součástí každé podkapitoly. Pro každý ze vztahů existuje i webová služba, jejímž zavoláním lze získat funkci pro výpočet daného vztahu zadáním pouze nutných parametrů. Popis jednotlivých webových služeb, včetně jejich WSDL, je uveden v příloze této práce.

Webová aplikace se nachází na serveru katedry aplikované kybernetiky na adrese <http://batman.kky.tul.cz/Fotovoltaika/Fotovoltaika.aspx>.

Webové služby se nacházejí na serveru na katedře aplikované kybernetiky adrese <http://batman.kky.tul.cz/Fotovoltaika/Service.asmx>.



6.1 – Úvodní stránka aplikace „Fotovoltaika“

6.1 Sluneční deklinace

Úhel udávající sluneční deklinaci $\delta [^\circ]$ udává, která rovnoběžka má v daný den ve dvanáct hodin Slunce kolmo nad horizontem. Je to také údaj, který udává, pod jakým úhlem je skloněná osa rotace Země. Pro 21. – 22. června (letní slunovrat) je $\delta = 23.5^\circ$. Pro 21. – 22. prosince (zimní slunovrat) je $\delta = -23.5^\circ$. Pro jarní a podzimní rovnodennost je $\delta = 0^\circ$.

a) Výpočet dle Cihelky(1994):

$$\delta = 23.45 \cdot \sin(\tau_h - 109) [^\circ] \quad (6.1)$$

$$\tau_h = 30.3 \cdot (m - 1) + d [^\circ] \quad (6.2)$$

d ... příslušný den v měsíci

m ... příslušný měsíc

den	měsíc	τ	$\delta [^\circ]$
21	1	50,28	-20,04
20	2	79	-11,72
21	3	109,68	0,27
21	4	139,38	11,86
22	5	170,06	20,52
22	6	199,76	23,44
23	7	230,44	20
23	8	260,14	11,32
23	9	289,84	-0,34
23	10	319,54	-11,91
22	11	348,26	-20,15
22	12	377,96	-23,44

Tabulka 6.1 – Výpočet τ a úhlu δ pro charakteristické dny v roce

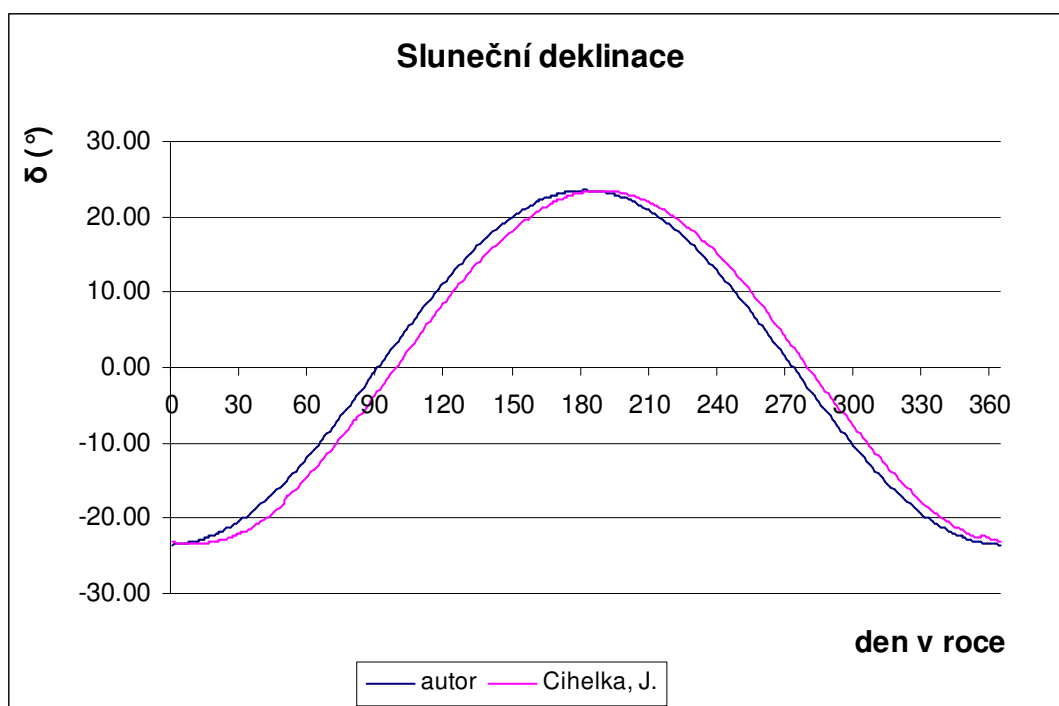
b) Výpočet dle autora:

$$\delta = -23.5 \cdot \left(\cos \left(\text{den} \cdot \frac{360}{365} \right) \right) [^\circ] \quad (6.3)$$

den ... je to počet dnů od 22.12.(den=1), 21.12 (den=365)

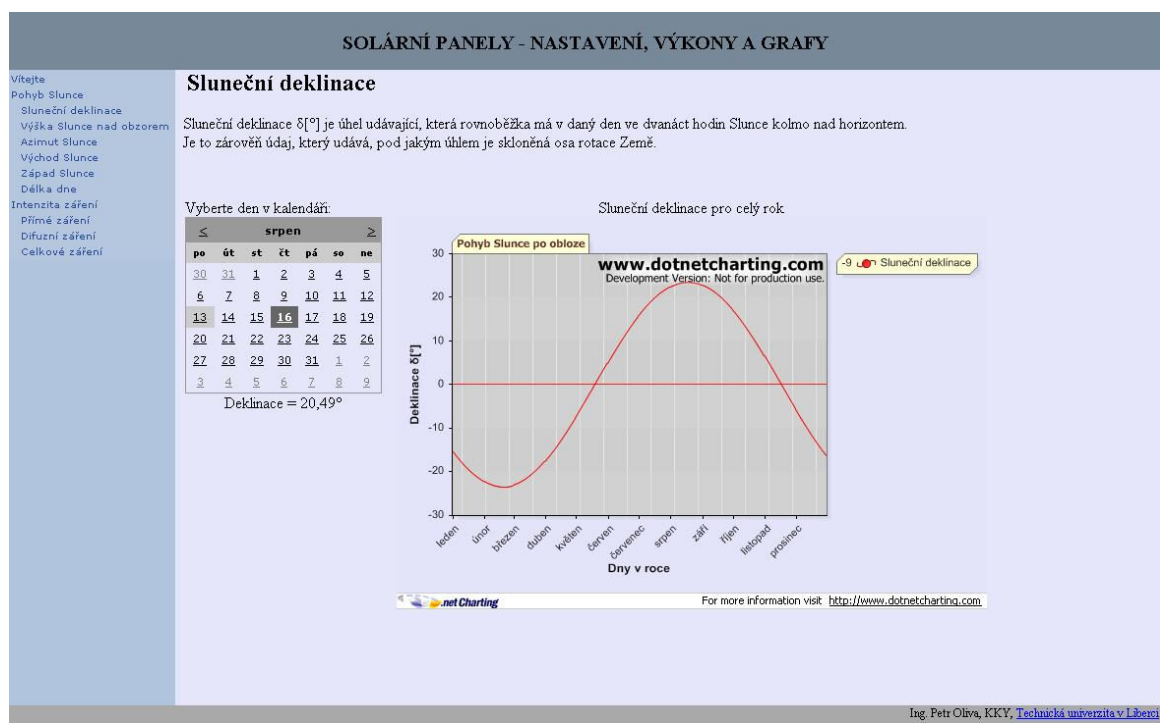
den	měsíc	den pro výpočet	$\delta[^\circ]$
21	1	30	-20,43
20	2	60	-12,04
21	3	89	-0,91
21	4	120	11,16
22	5	151	20,13
22	6	182	23,5
23	7	213	20,33
23	8	244	11,52
23	9	275	-0,5
23	10	305	-12,03
22	11	335	-20,43
22	12	1	-23,5

Tabulka 6.2 – Výpočet úhlu δ pro charakteristické dny v roce



Obrázek 6.2 – Porovnání průběhů úhlu δ pro každý den v roce

Poznámka: V následujících výpočtech je vždy použita δ vypočtená dle autora.



6.3 – Stránka o sluneční deklinaci z aplikace „Fotovoltaika“

6.2 Výška Slunce nad obzorem

Výška Slunce nad obzorem h [°] je hodnota, která indikuje úhel mezi pozorovacím místem a Sluncem, tzn. pod jakým úhlem je Slunce vidět. Tato hodnota nezáleží jen na čase, ale také na geografické poloze místa, ze kterého Slunce pozorujeme a také na sluneční deklinaci, tj. na datu. Pomocí těchto tří hodnot je možné určit polohu Slunce nad obzorem.

$$h = \arcsin(\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(T)) \quad [^\circ] \quad (6.4)$$

δ [°]... sluneční deklinace

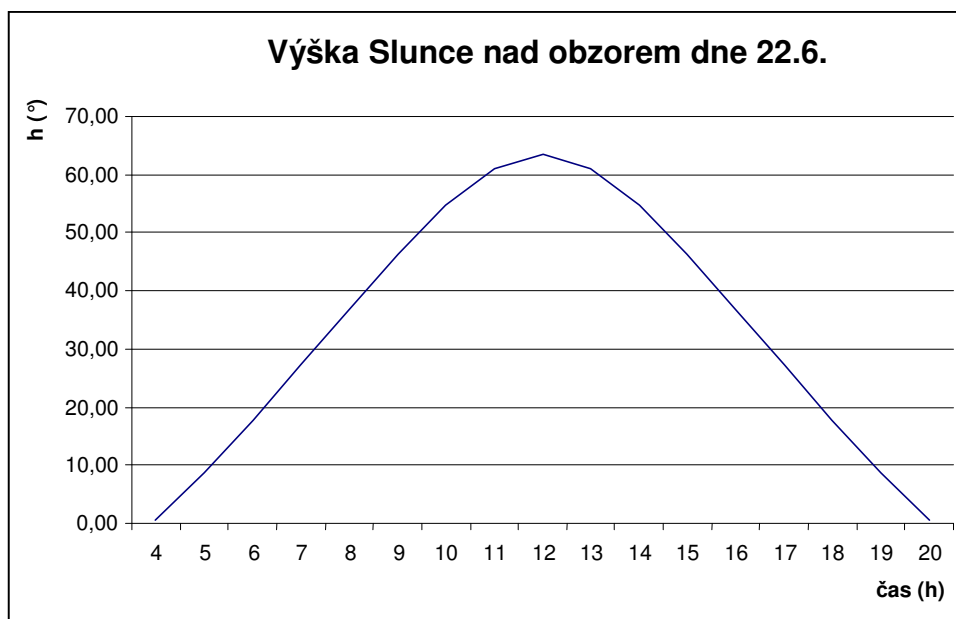
φ [°]... zeměpisná šířka

T [°]... sluneční úhel, Sluneční čas měřený od 12 hodin ($T = 0^\circ$), pro každou další hodinu je T zvětšeno o 15° (pro 13 hodin je $T = 15^\circ$, pro 14 hodin je $T = 30^\circ$). Pro každou hodinu před 12 je T zmenšeno o 15° (pro 11 hodin je $T = -15^\circ$, pro 10 hodin je $T = -30^\circ$). Ke stupňovému údaji 15° lze dojít snadno podělením 360° , které má Země, ku 24h, které má den.

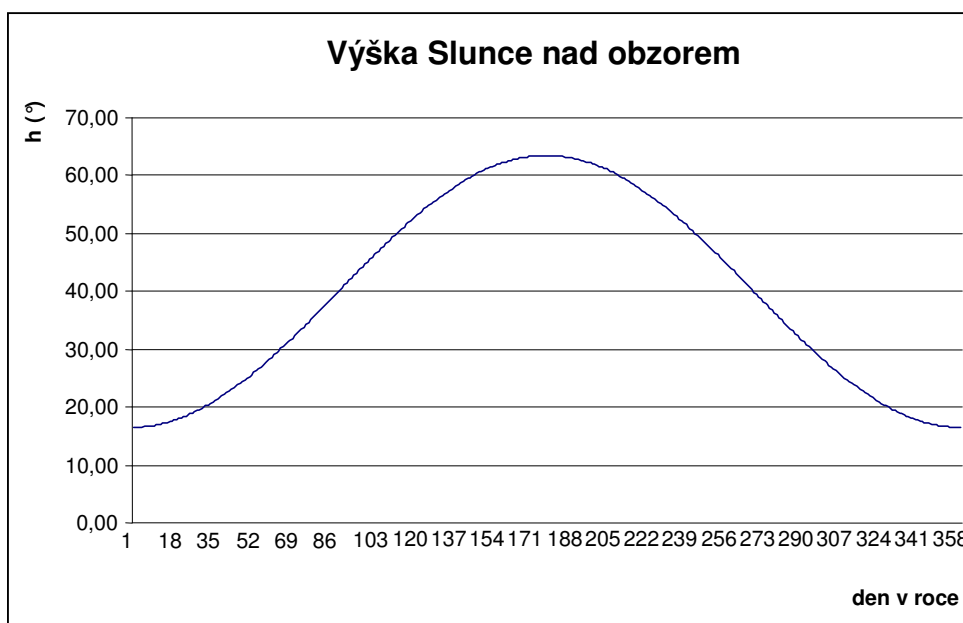
hodina	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T [°]	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0

hodina	13	14	15	16	17	18	19	20
T [°]	15	30	45	60	75	90	105	120

Tabulka 6.3 – Tabulka úhlu T pro různé denní hodiny



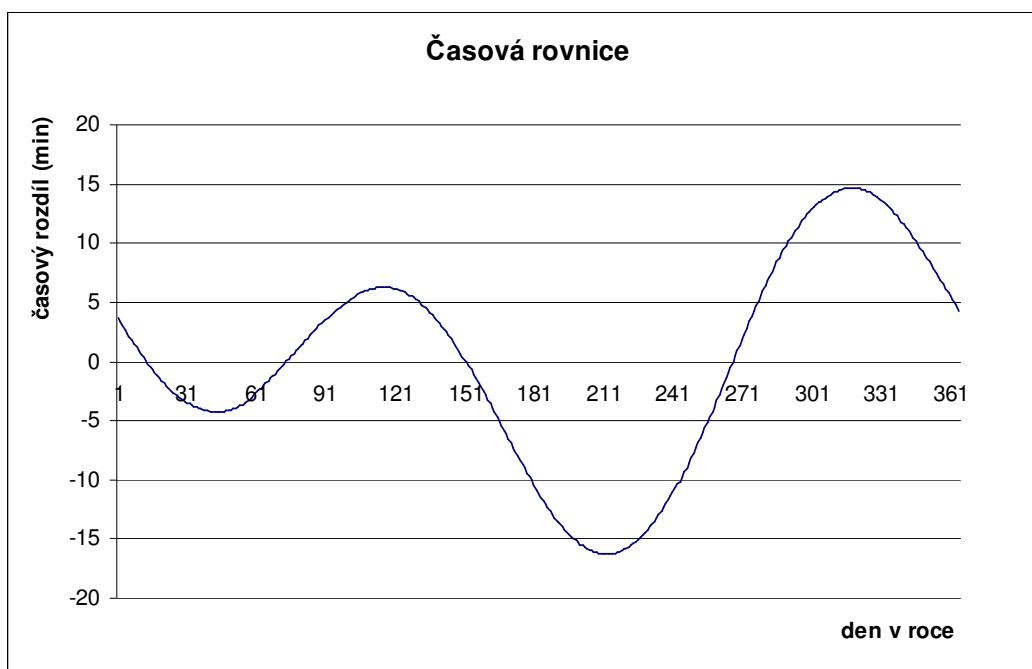
Obrázek 6.4 – Výška Slunce nad obzorem dne 22.6. zobrazená pro celý den



Obrázek 6.5 – Výška Slunce nad obzorem po celý rok ve 12 hodin

V celém tomto výpočtu vycházíme z údaje, že rok trvá přesně 365 dnů. Avšak ve skutečnosti tomu tak není. Rok trvá 365 dnů, 5 hod, 48min, 5s. Z tohoto lze snadno usoudit, že místní časový údaj pro výpočet polohy Slunce není úplně přesný. Rozdíl mezi skutečným slunečním časem a místním časem pak lze vyjádřit pomocí časové rovnice. Časová rovnice:

$$\eta = 0.123 \cdot \cos\left(360 \cdot \left(88 + \frac{\tau_h}{365}\right)\right) - 0.167 \cdot \sin\left(720 \cdot \frac{10 + \tau_h}{365}\right) \text{ [h]} \quad (6.5)$$



Obrázek 6.6 – Časová rovnice, rozdíl skutečného slunečního času a místního času

Z obrázku (Obrázek 6.6) je patrné, že v některých dnech se Sluneční čas liší od místního až o 15 minut.

Díky výše uvedeným časovým rozdílům lze upravit sluneční úhel pro výpočet následujícím způsobem:

$$T = 15 \cdot (T^* - 12 + \eta) + \lambda - 15 \quad [^\circ] \quad (6.6)$$

kde

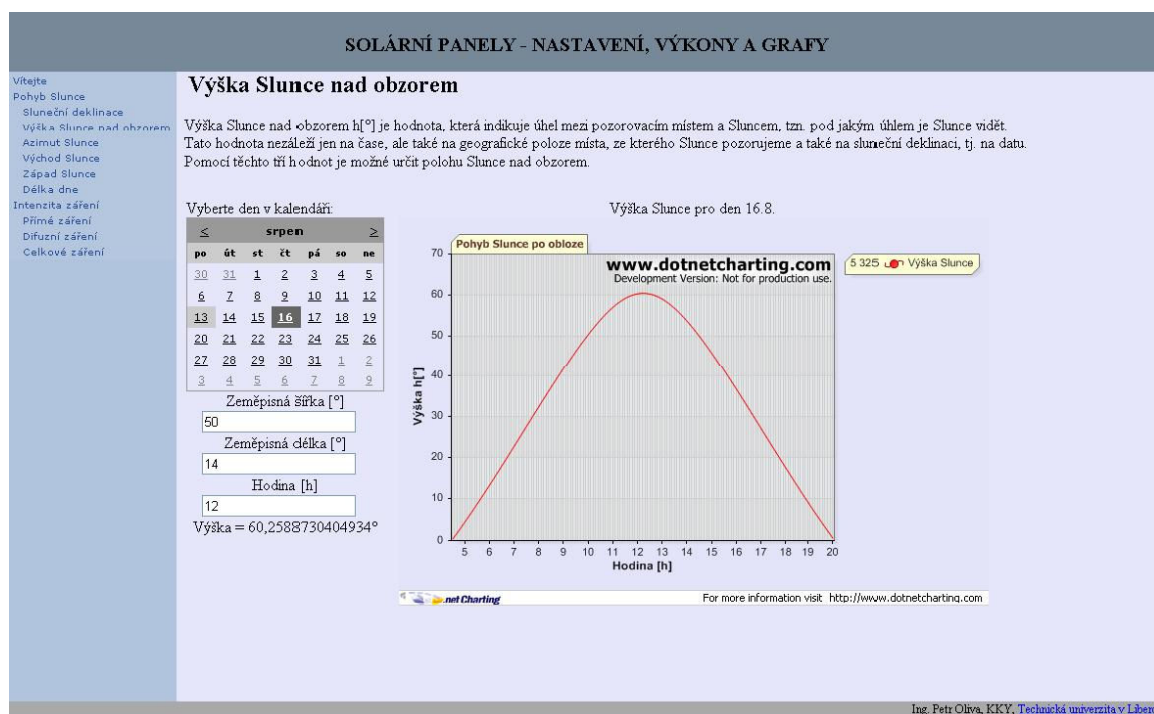
T^* [h] - je středoevropský čas

λ [°] – je zeměpisná délka (nebo-li sférické vzdálenost sledovaného místa od meridiánu 0, Greenwich, směrem k východu)

hodina	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T [°]	-121,82	-106,82	-91,82	-76,82	-61,82	-46,82	-31,82	-16,82	-1,82

hodina	13	14	15	16	17	18	19	20
T [°]	13,18	28,18	43,18	58,18	73,18	88,18	103,18	118,18

Tabulka 6.4 – Tabulka úhlu T pro různé denní hodiny, upravené dle časové rovnice pro den 22.6.



6.7 – Stránka o výšce Slunce nad obzorem z aplikace „Fotovoltaika“

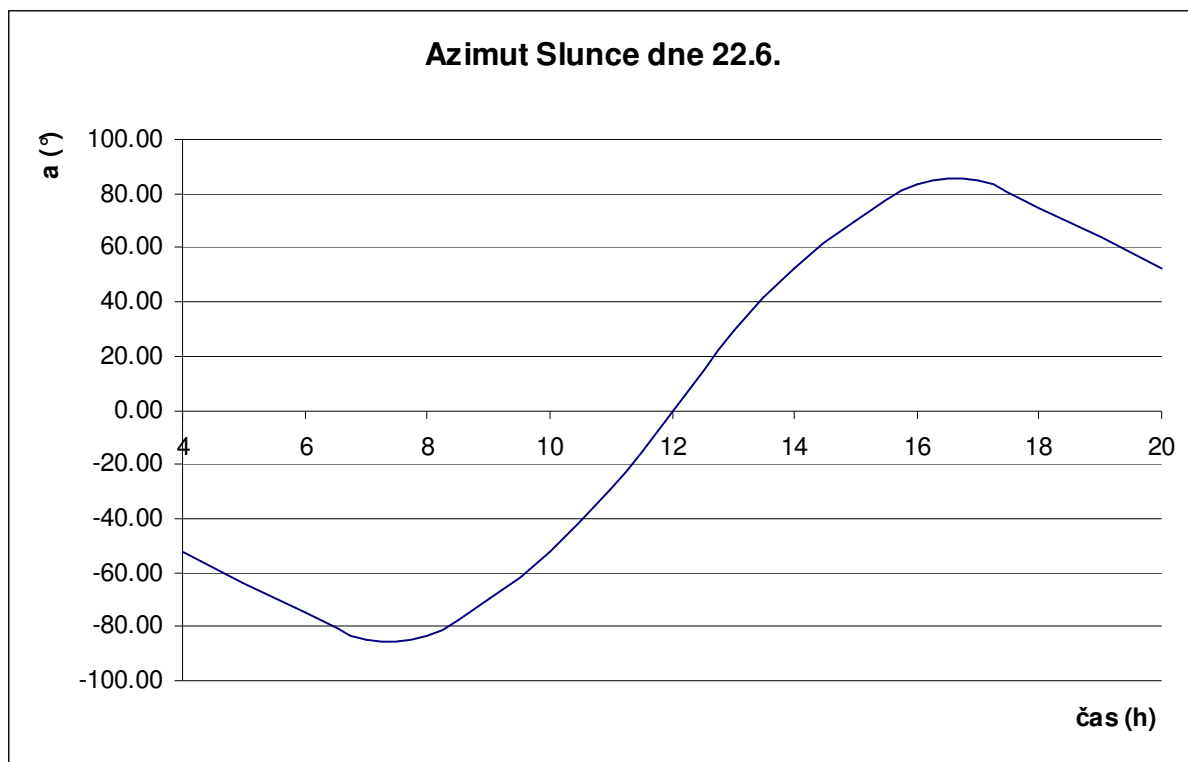
6.3 Azimet Slunce

Sluneční azimet $a[^\circ]$ je měřen od jihu. Ve směru hodinových ručiček jako kladná hodnota a proti směru hodinových ručiček jako záporná hodnota. Ve dvanáct hodin je azimet roven 0° .

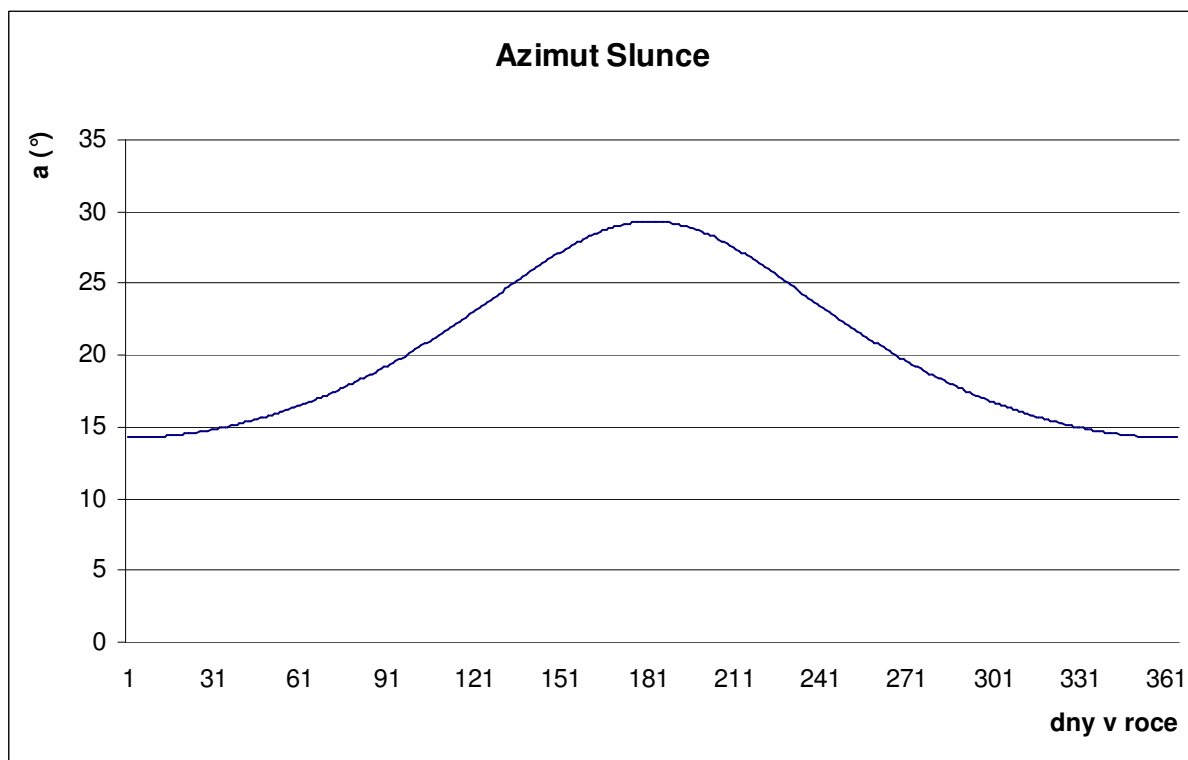
$$a = \arcsin\left(\frac{\sin(T) \cdot \cos(\delta)}{\cos(h)}\right) [^\circ] \quad (6.7)$$

den	21.1.	20.2.	21.3.	21.4.	22.5.	22.6.	23.7.	23.8.	23.9.	23.10.	22.11.	22.12.
azimet $[^\circ]$	14,9	16,9	19,5	23,9	29,2	32,1	29,3	24	19,6	16,6	14,9	14,3

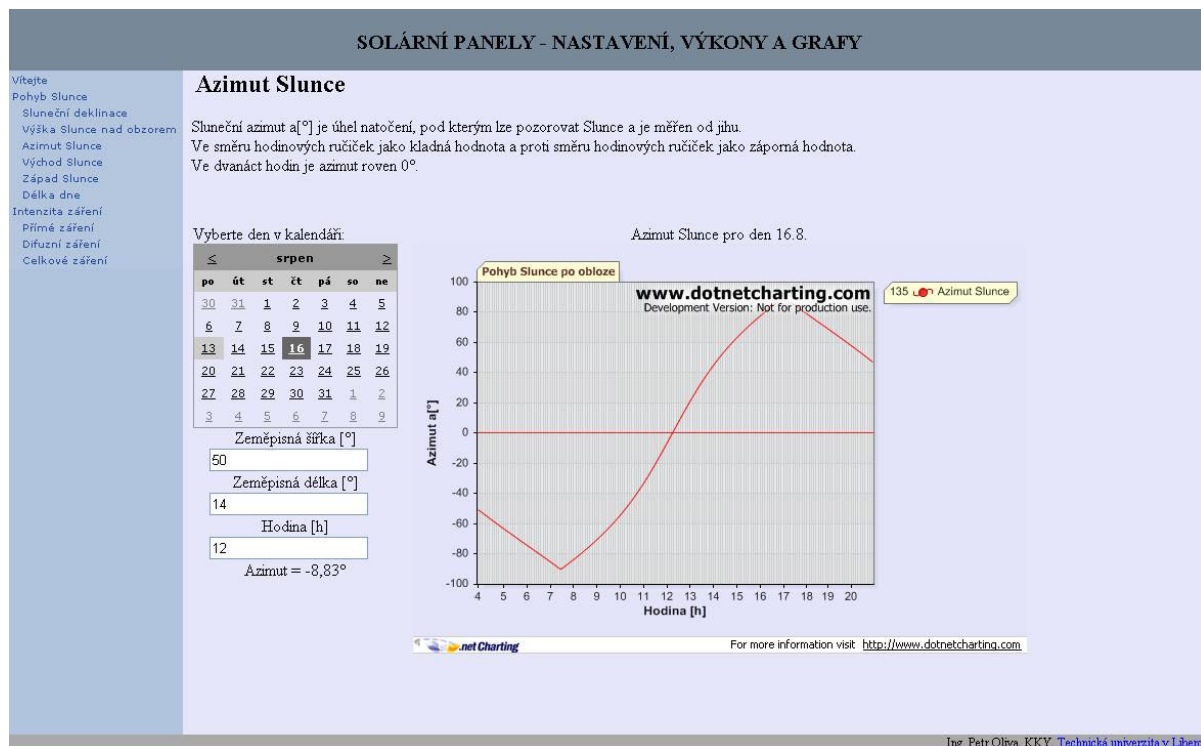
Tabulka 6.5 – Azimet Slunce v charakteristických dnech ve 13 hodin



Obrázek 6.8 – Azimut Slunce dne 22.6. od východu do západu Slunce



Obrázek 6.9 – Azimut Slunce v průběhu roku ve 13 hodin



6.10 – Stránka o azimutu Slunce z aplikace „Fotovoltaika“

6.4 Východ Slunce, západ Slunce a délka dne

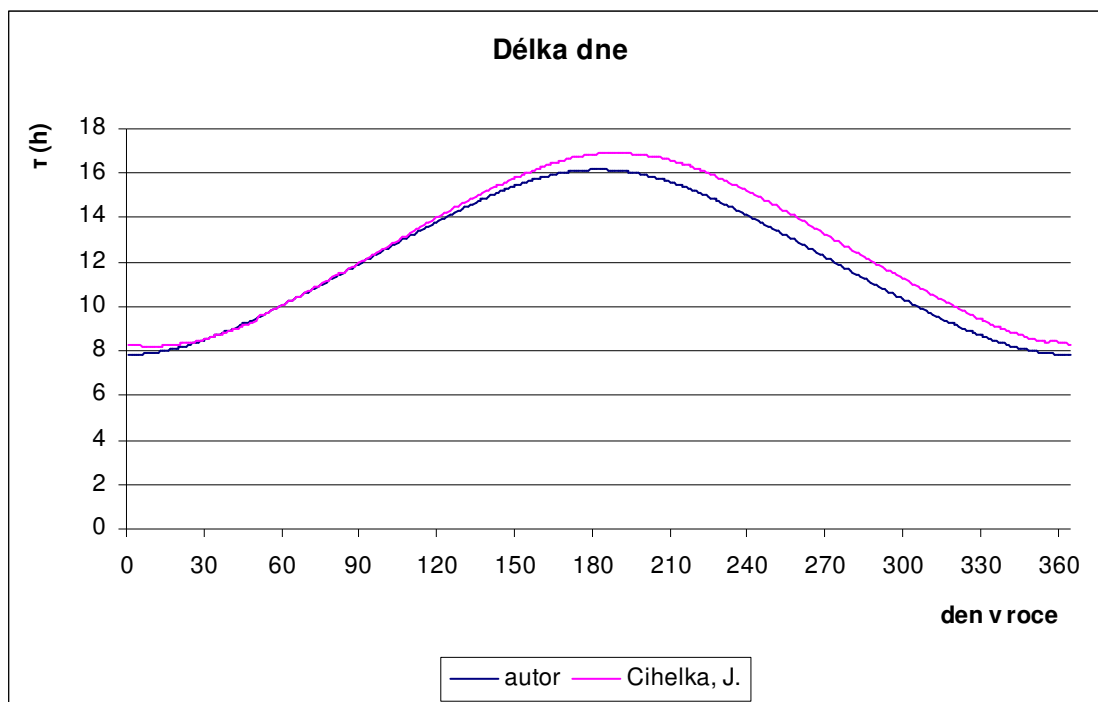
Východ Slunce, západ Slunce a délka trvání dne spolu neodmyslitelně souvisí. Odečteme-li od času západu Slunce čas východu Slunce, dostaneme délku dne.

a) Výpočet dle Cihelky(1994):

$$\text{Délka dne : } \tau = \frac{2 \cdot \arccos(-\tan(\delta) \cdot \tan(\varphi))}{15} [\text{hod}] \quad (6.8)$$

b) Výpočet dle autora:

$$\text{Délka dne : } \tau = \frac{720}{180} \cdot (180 + 2 \cdot \arcsin(\tan(\delta) \cdot \tan(\varphi))) [\text{min}] \quad (6.9)$$



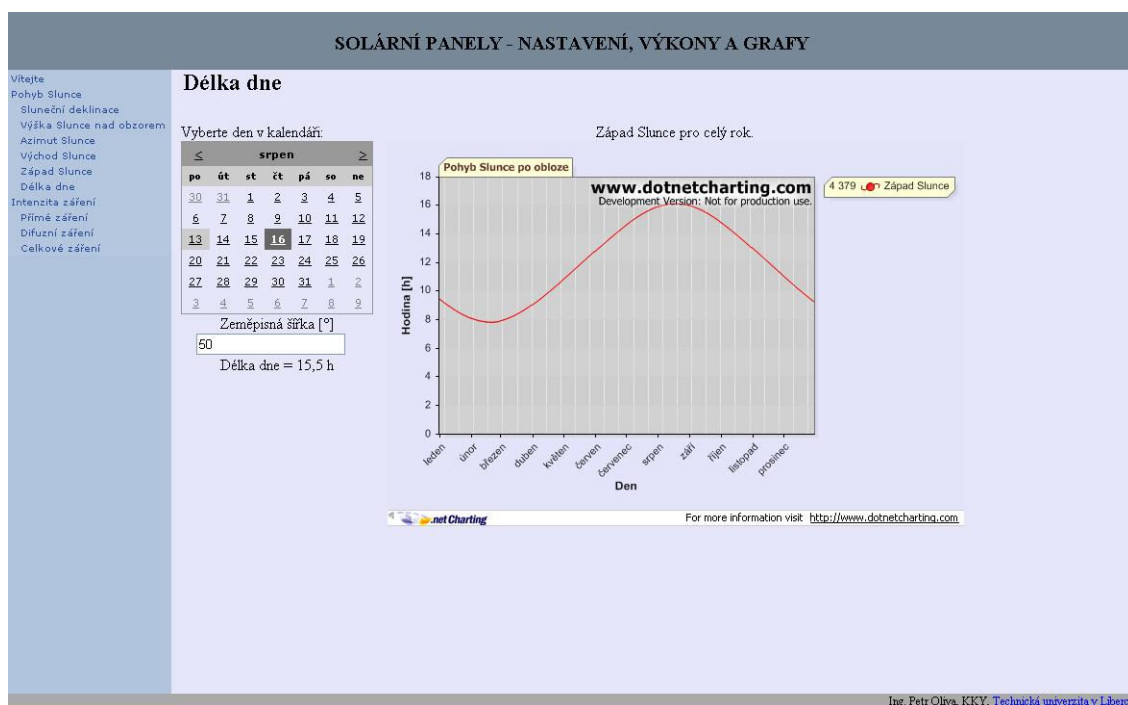
Obrázek 6.11 – Porovnání délek dne pro každý den v roce

Délka dne je dána odvozeným vztahem a z něho se vypočítává východ a západ Slunce. Vychází se ze známého faktu, že ve dvanáct hodin je den v polovině svého trvání. Podělíme-li tedy délku trvání dne dvěma a odečteme (přičteme) jí od (k) dvanácti, dostaneme východ (západ) Slunce.

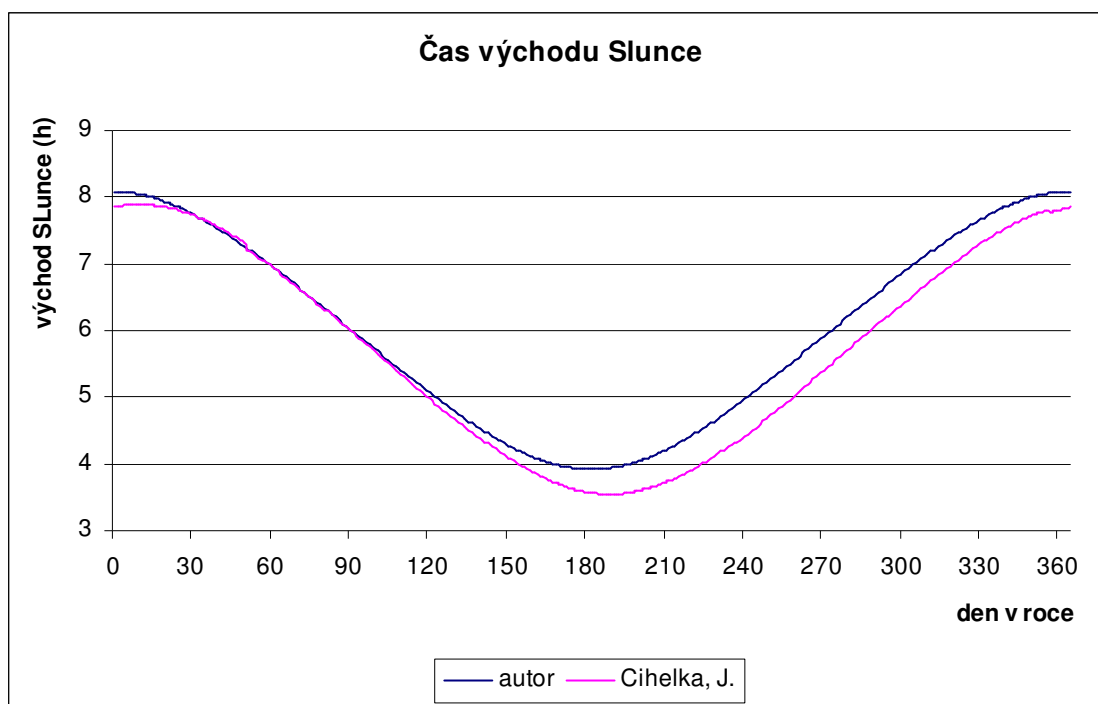
Pro výpočty *ad a* a *ad b* platí níže uvedené vztahy:

$$\text{Východ Slunce : } \tau_v = 720 - \frac{\tau}{2} \text{ [min]} \quad (6.10)$$

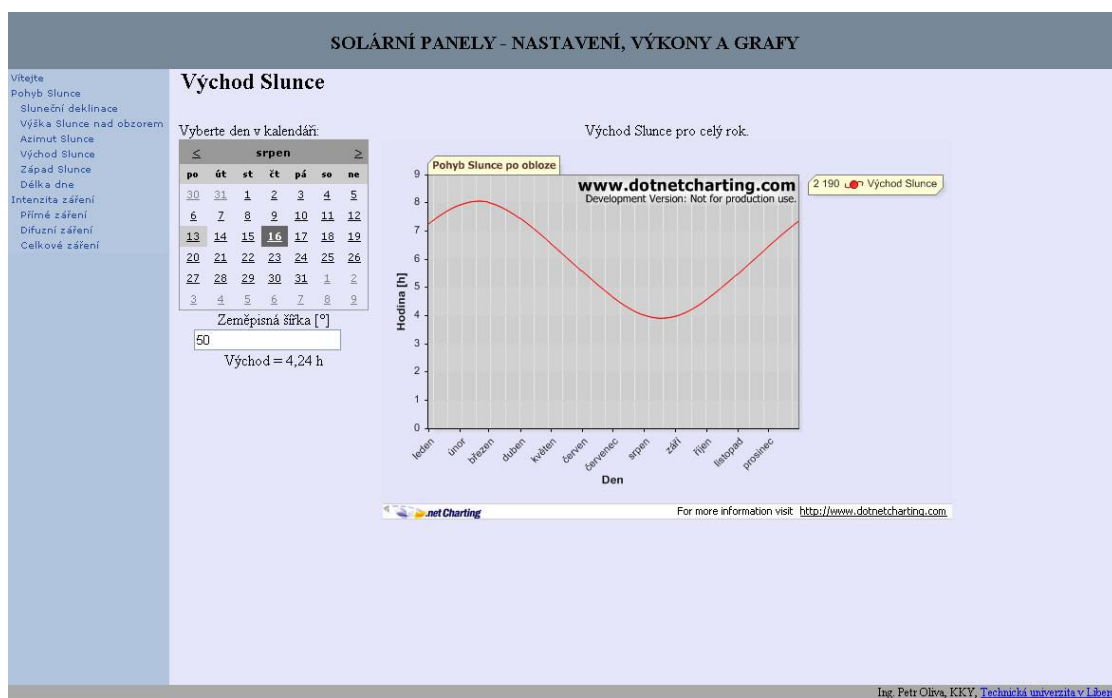
$$\text{Západ Slunce: } \tau_z = 720 + \frac{\tau}{2} \text{ [min]} \quad (6.11)$$



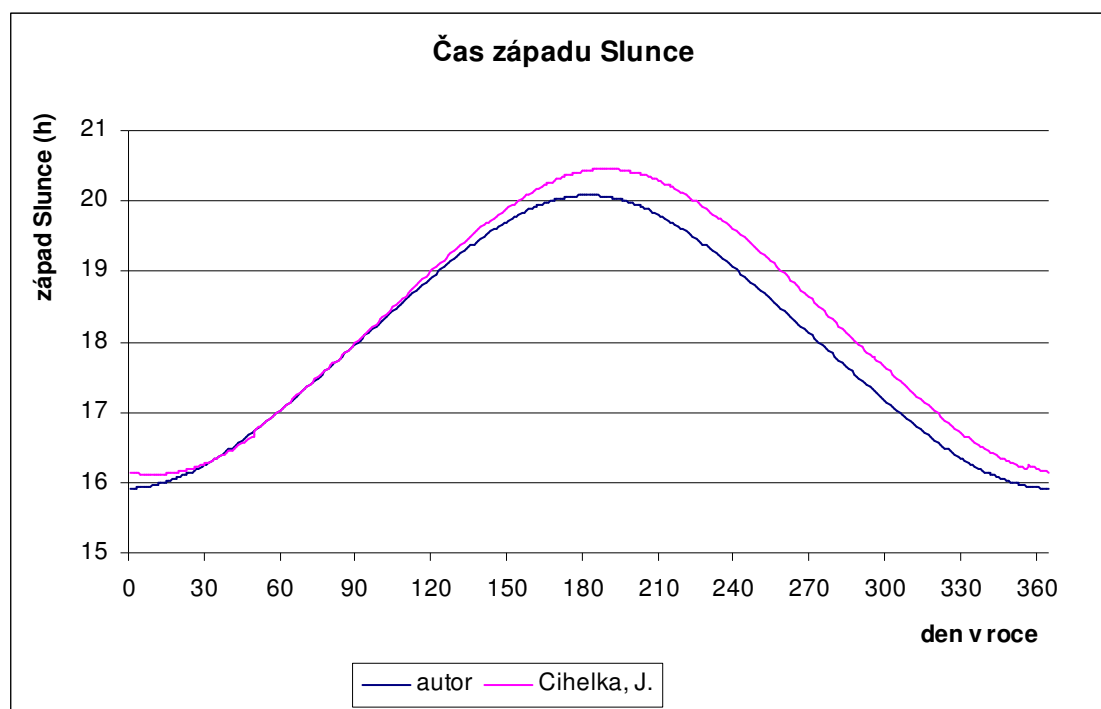
6.12 – Stránka o délce dne z aplikace „Fotovoltaika“



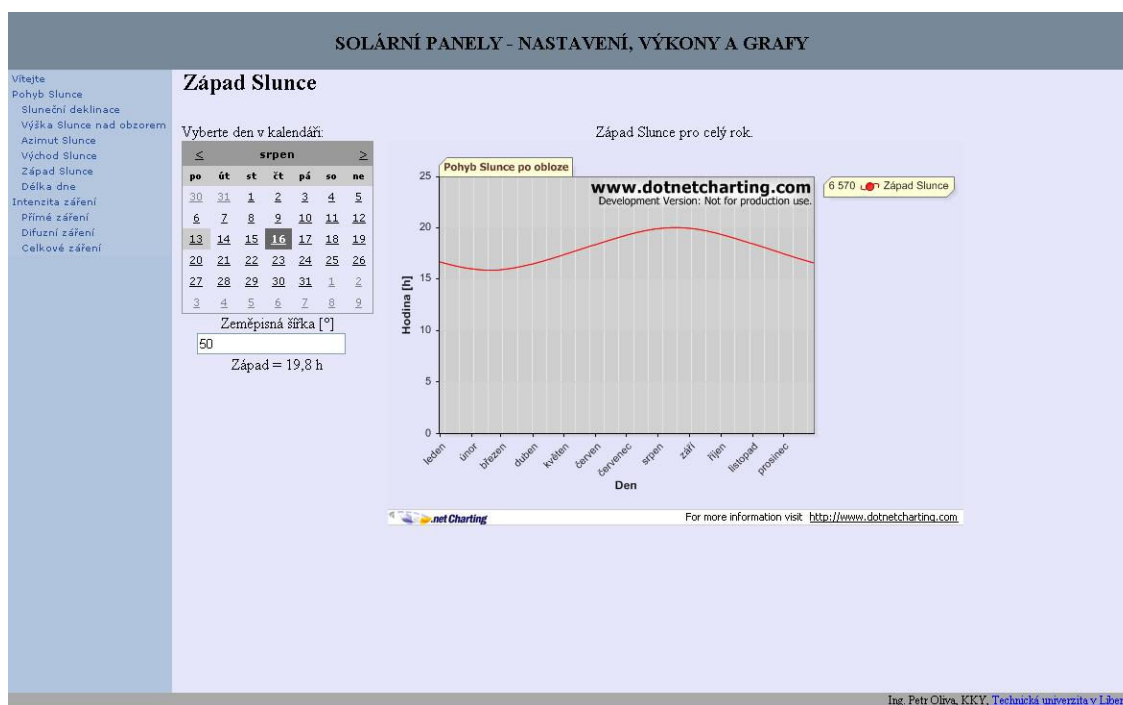
Obrázek 6.13 – Porovnání času východu Slunce pro každý den v roce



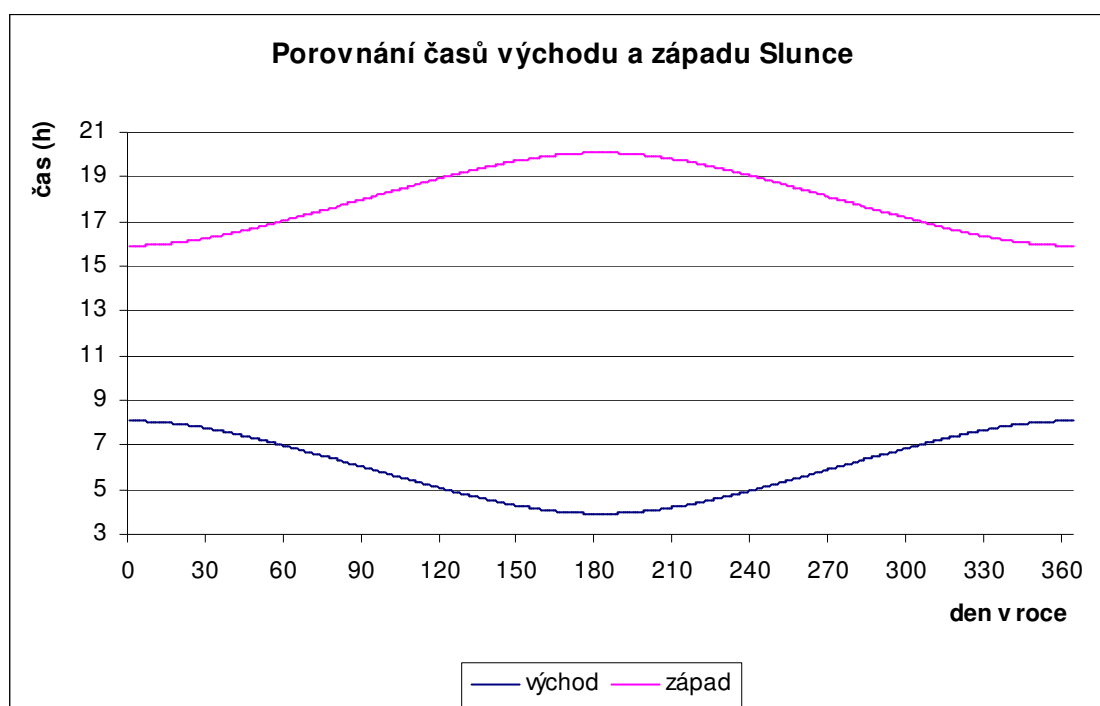
6.14 – Stránka o času východu Slunce z aplikace „Fotovoltaika“



Obrázek 6.15 – Čas západu Slunce pro každý den v roce



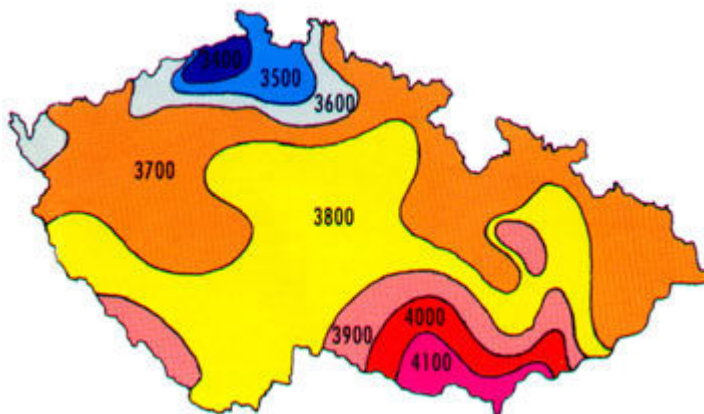
6.16 – Stránka o času západu Slunce z aplikace „Fotovoltaika“



Obrázek 6.17 – Porovnání časů východu a západu Slunce pro každý den v roce

7 Energie ze Slunce

Povrchová teplota Slunce je přibližně 6000 K a vyzařuje kolem sebe do prostoru paprsky o vlnových délkách od 10^{-10} do 10^{-6} m. Z těchto vyzařovaných délek jsou nejvýznamnější paprsky o vlnové délce od $0,2 \cdot 10^{-6}$ do $3 \cdot 10^{-8}$ m. Z celkové vyzařované energie ze Slunce je na hranici Zemské atmosféry intenzita záření $I_0=1340$ až 1390 Wm^{-2} (průměrně tedy $I_0=1360 \text{ Wm}^{-2}$). Tato hodnota se nazývá sluneční konstanta.



Obrázek 7.1 - Globální sluneční záření na území ČR (MJ/m^2 za rok) (www.chmu.cz)

7.1 Průchod slunečního záření zemskou atmosférou

Při průchodu slunečních paprsků zemskou atmosférou se jejich intenzita značně zmenšuje. Dochází k rozptylu paprsků odrazem o molekuly plynů a o částičky prachu nebo vody ve vzduchu, také k absorpci záření víceatomovými plyny, např. H_2O , CO_2 a O_3 , které jsou obsaženy ve vzduchu. Index znečištění atmosféry těmito nežádoucími prvky vůči průchodu slunečních paprsků je závislý také na atmosférickém tlaku (na nadmořské výšce). Tento index znečištění je definován Linkeho vztahem :

$$Z = \frac{\ln I_0 - \ln I_n}{\ln I_0 - \ln I_e} \quad (7.1)$$

I_0 – sluneční konstanta (průměrně 1360 Wm^{-2})

I_n – intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při daném znečištění ovzduší

I_e – intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům při dokonale čistém ovzduší

Tento součinitel Z je závislý na koncentraci exhalací. Proto jsou jeho hodnoty vysoké ve městech, kde je vzduch více znečištěn; na venkově, kde je vzduch čistší je Z malé. S přibývajícím nadmořskou výškou se Z zmenšuje. Nejmenší hodnoty se dají naměřit na vrcholcích velehor ($Z = 2$), ve městech s velkým znečištěním Z nabývá hodnot 5 až 6 a v některých velmi znečištěných městech lze krátkodobě naměřit i $Z = 8$.

Součinitel znečištění atmosféry Z není v daném místě stálý, ale mění se jak v průběhu roku, tak i v průběhu každého dne. Dalšími faktory ovlivňující Z jsou koncentrace znečišťujících látek v ovzduší a vlivy počasí.

V této práci je při výpočtech uvažováno znečištění $Z = 3$.

7.2 *Intenzita slunečního záření*

Pro výpočet energetického účinku slunečního záření je nutné znát intenzitu záření dopadajícího na povrch země, tj. na plochu pod vrstvou atmosféry. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, sluneční záření se částečně rozptýlí a pohltí při průchodu zemskou atmosférou, takže na povrchu země je intenzita přímého slunečního záření na plochu kolmou ke směru paprsků menší, než je intenzita slunečních paprsků na povrchu atmosféry. Zmenšení této intenzity závisí jak na součiniteli znečištění Z , tak i na tloušťce vrstvy vzduchu, kterou paprsky pronikají. Sluneční záření dopadající na zemi se dělí na přímé sluneční záření a difusní sluneční záření (odražené). Celková dopadající energie na zemi je dána součtem těchto dvou záření. Všechny níže uvedené vztahy jsou převzaty z literatury (Cihelka, 1994).

7.2.1 Určení polohy Slunce nad obzorem

Směr dopadu slunečních paprsků je dán vzájemnou polohou slunce nad obzorem Země a osluněné plochy. V každém časovém okamžiku je poloha Slunce vůči Zemi dána dvěma základními parametry.

Jsou to:

- Výška Slunce nad obzorem h (kapitola 6.2)
- Azimut Slunce a (kapitola 0)

Při známé poloze Slunce na obloze lze určit úhel dopadu slunečních paprsků na obecně položenou plochu, tj. úhel γ , který svírá normála osluněné plochy se směrem slunečních paprsků.

$$\cos \gamma = \sin(h) \cdot \cos(\alpha) + \cos(h) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(a - a_n) \quad (7.2)$$

α – úhel sklonu osluněné plochy od vodorovné roviny

a_n – azimut normály osluněné plochy měřený stejně jako azimut Slunce (od jihu, ve smyslu otáček hodinových ručiček jako kladná hodnota a proti směru jako záporná hodnota)

7.2.2 Přímé sluneční záření

Intenzita přímého záření na plochu kolmou ke směru dopadajících paprsků I_{pn} je dána

$$I_{pn} = I_0 \cdot e^{\left(\frac{-Z}{\varepsilon}\right)} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (7.3)$$

I_0 – sluneční konstanta (průměrně $I_0 = 1360 \text{ Wm}^{-2}$)

Z – součinitel znečištění atmosféry

ε – součinitel, který je závislý na výšce slunce nad obzorem a na nadmořské výšce daného místa

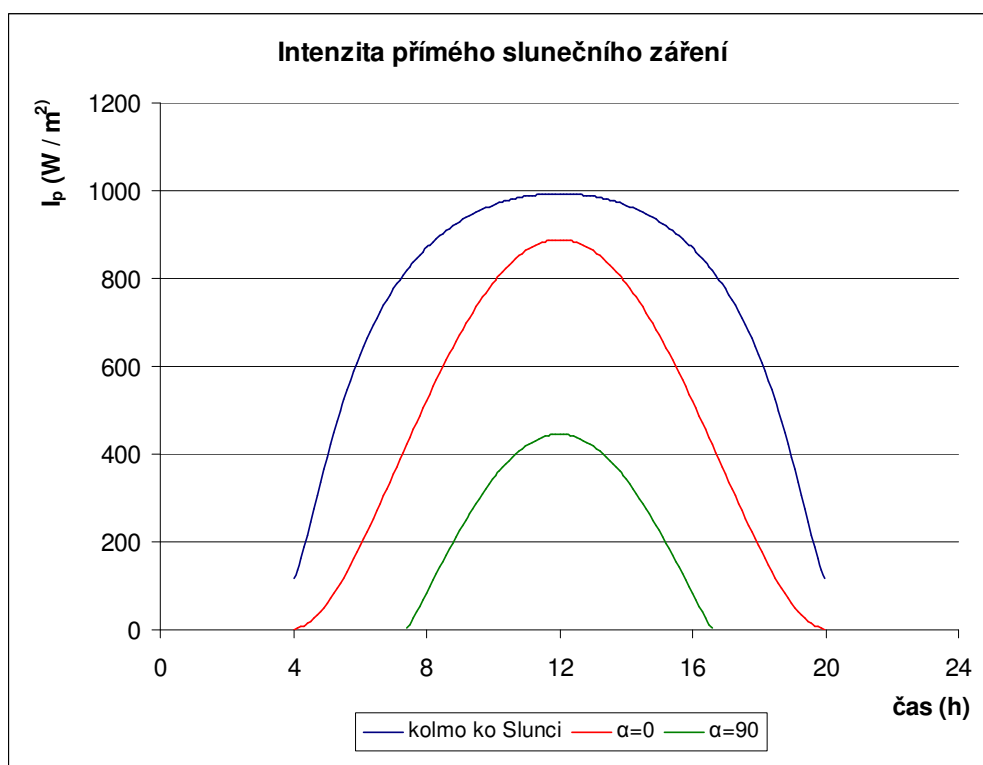
$$\varepsilon = \frac{9,38076 \cdot \left[\sin(h) + (0,003 + \sin^2(h))^{\frac{1}{2}} \right]}{2,0015 \cdot (1 - H \cdot 10^{-4})} + 0,91018 \quad [-] \quad (7.4)$$

h – výška Slunce nad obzorem

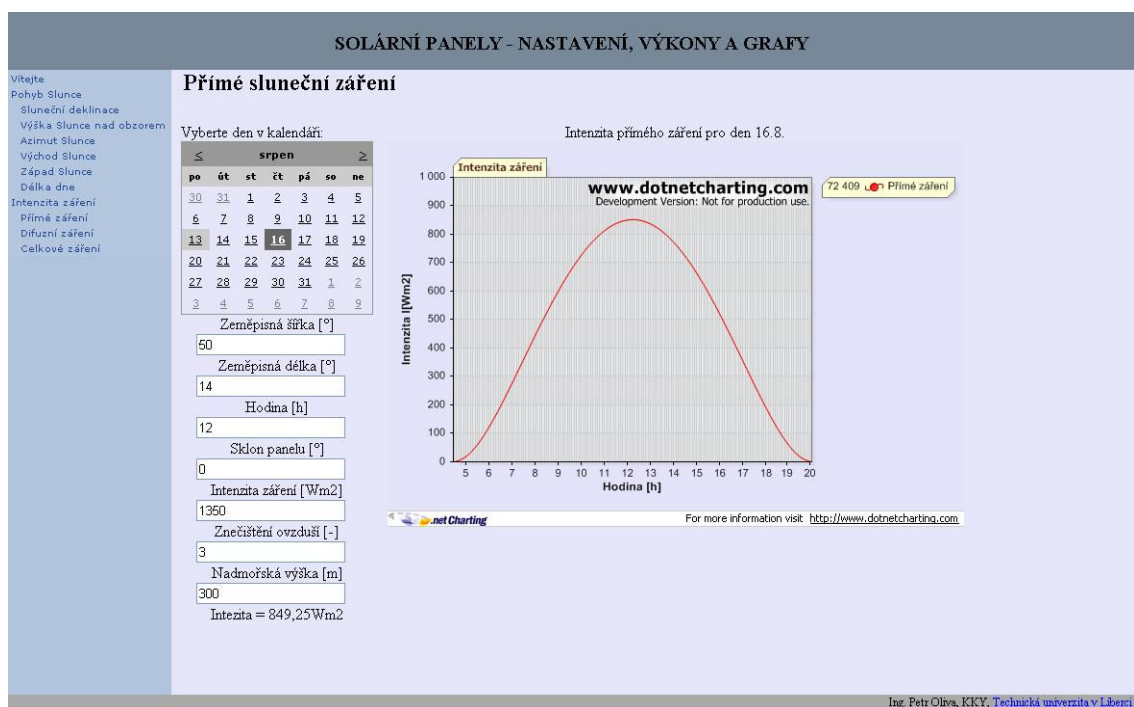
H – nadmořská výška daného místa (pro ČR je průměrná hodnota $H = 300\text{m}$) (Cihelka, 1994)

Intenzitu přímého slunečního záření na obecně položenou plochu, lze jednoduše přepočítat dle vztahu

$$I_p = I_{pn} \cdot \cos(\gamma) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (7.5)$$



Obrázek 7.2 – Intenzita přímého slunečního záření dne 21.6., $Z=3$, $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$



7.3 – Stránka o intenzitě přímého záření z aplikace „Fotovoltaika“

7.2.3 Difusní sluneční záření

Difusní sluneční záření je takové, které se při průchodu zemskou atmosférou rozptýlí o molekuly plynů, částičky prachu, oblačnost a absorbuje záření víceatomovými plyny. Po tomto rozptýlu a pohlcení se vlnová délka dopadajícího záření nezmění, takže je stejná jako u záření přímého. Do difusního záření se také počítá část přímého záření, které se odrazí od okolních ploch, například od budov. Intenzitu difusního záření lze vypočítat

$$I_D = 0,5 \cdot (1 + \cos(\alpha)) \cdot I_{Dh} + 0,5 \cdot r \cdot (1 - \cos(\alpha)) \cdot (I_{Ph} + I_{Dh}) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (7.6)$$

α – úhel sklonu osluněné plochy od vodorovné roviny

r – reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky, tzv. albedo ($r=0,15 - 0,25$)

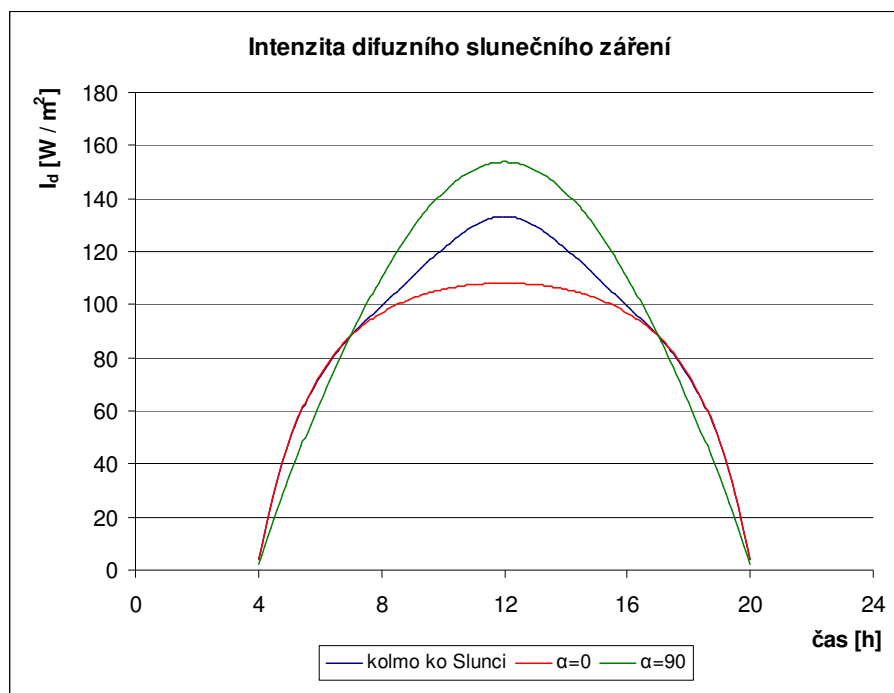
I_{Ph} – intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu

I_{Dh} – intenzita difusního záření na vodorovnou plochu

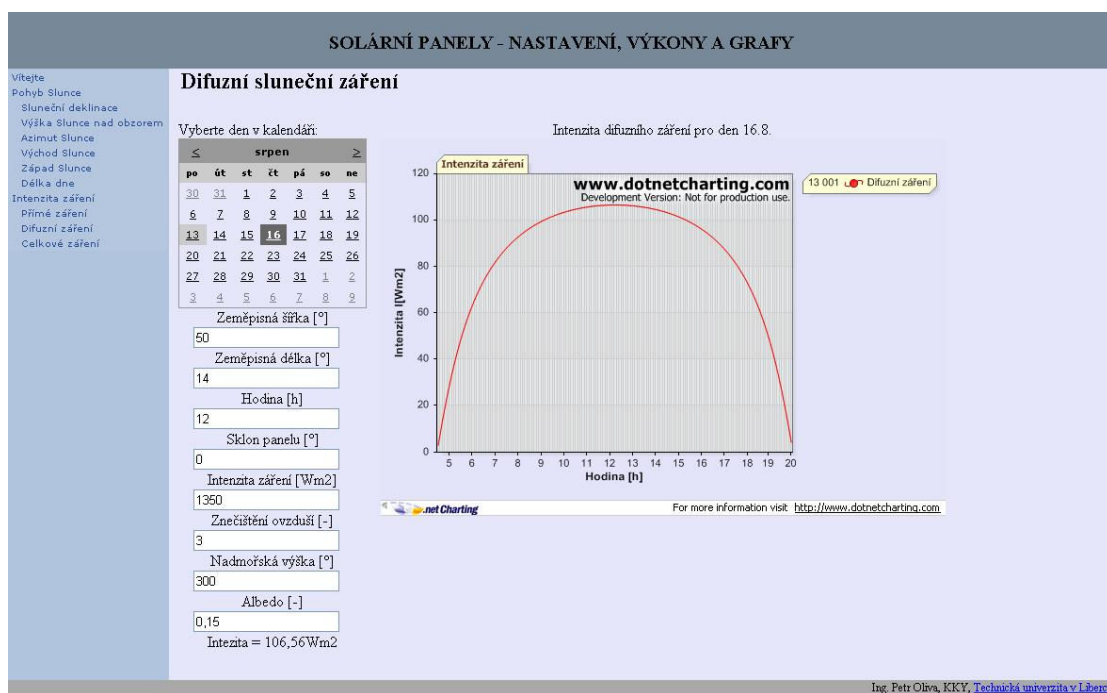
$$I_{Ph} = I_{Pn} \cdot \sin(h) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (7.7)$$

$$I_{Dh} = 0,33 \cdot (I_0 - I_{Pn}) \cdot \sin(h) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (7.8)$$

Difusní sluneční záření, oproti přímému slunečnímu záření, dopadá na osluněnou plochu i v době, kdy jsou na obloze oblačnost (je zataženo) a Slunce tedy přímo nesvítí. Odraz paprsků od okolí je tedy menší, ale zvětšuje se rozptyl slunečných paprsků v atmosféře. (Cihelka, J.)



Obrázek 7.4– Intenzita difuzního záření pro tři různé polohy sklonu panelu, dne 21.6., $Z=3, \varphi=50^\circ, \lambda=15^\circ, r=0,2$



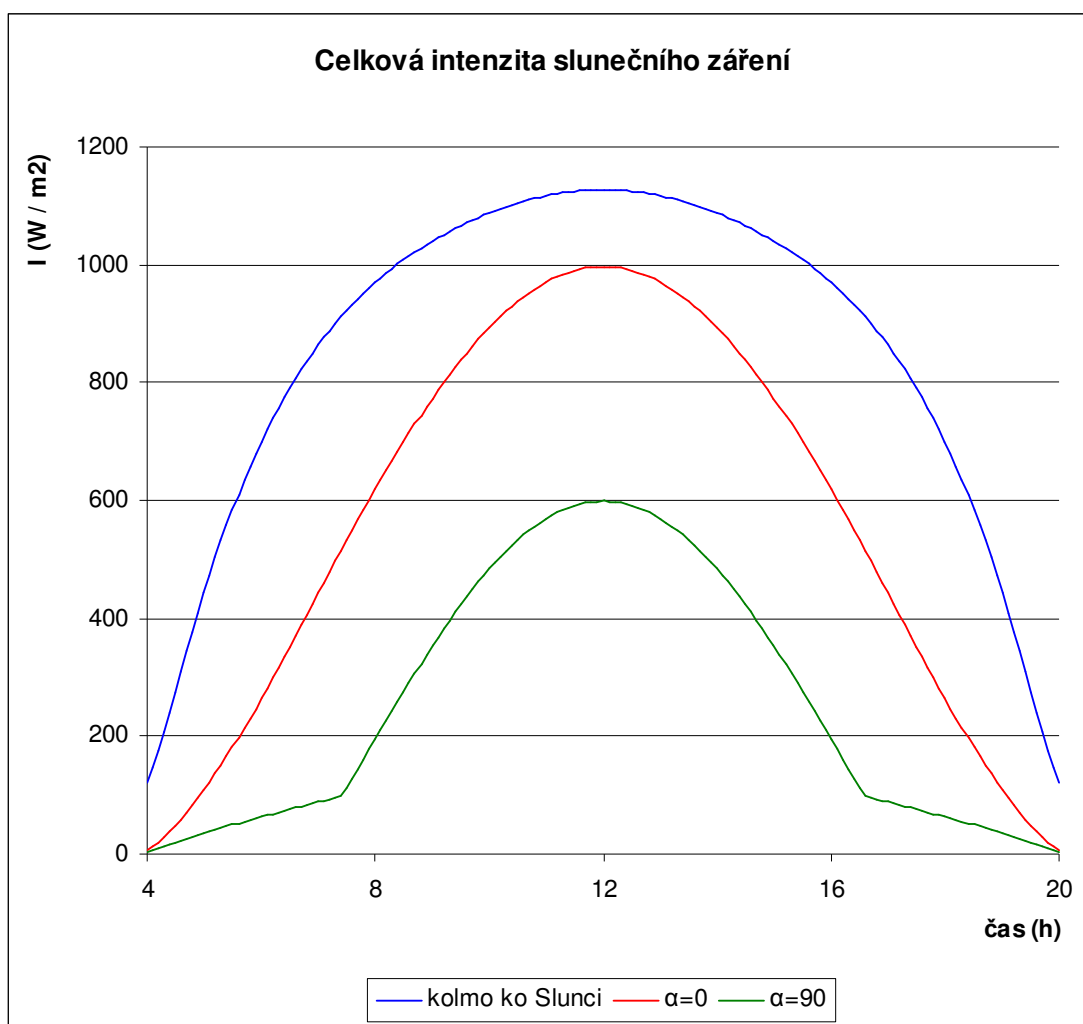
7.5 – Stránka o intenzitě difuzního záření z aplikace „Fotovoltaika“

7.2.4 Výsledná energie ze slunečních paprsků

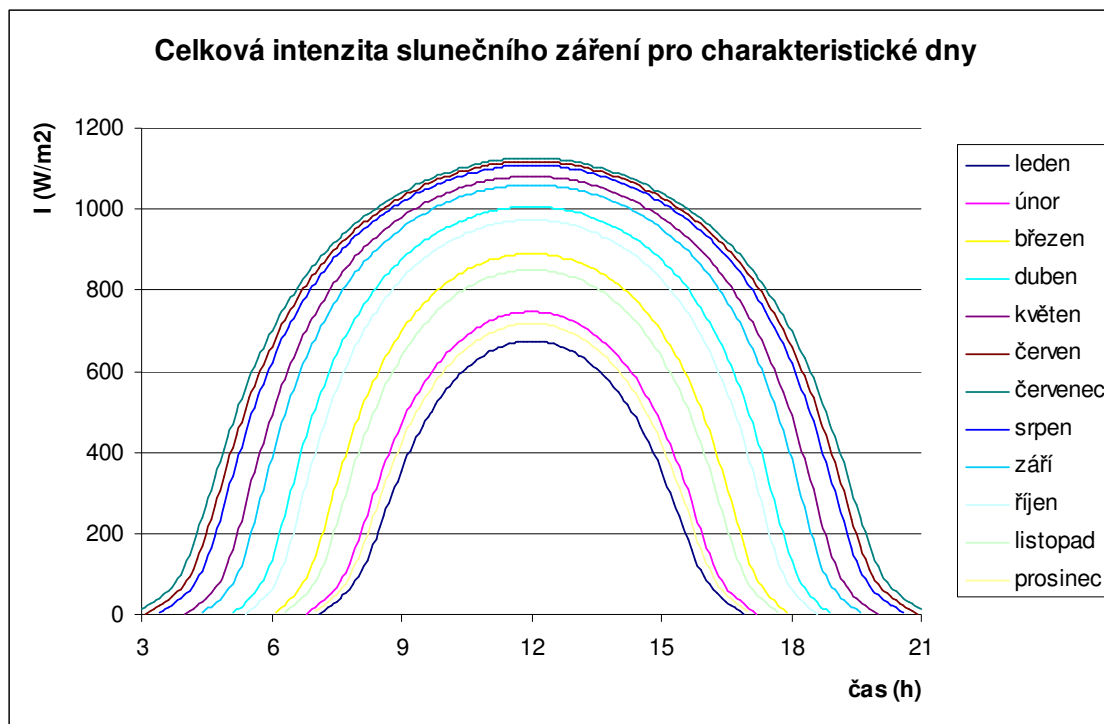
Sluneční záření dopadající na osluněnou plochu se skládá ze dvou částí. Z přímého slunečního záření I_p a z difusního slunečního záření I_D . Intenzita celkového slunečního záření je dána vztahem

$$I = I_p + I_D \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (7.10(7.9))$$

$$I = I_p + I_D \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (7.10)$$



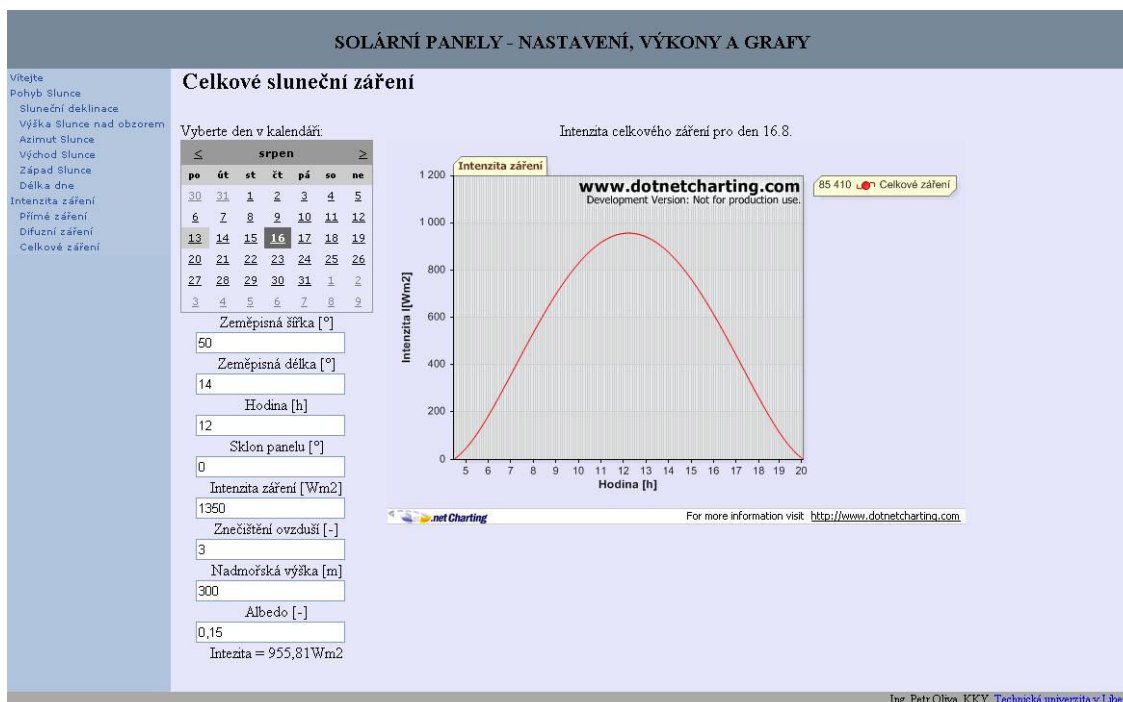
Obrázek 7.6 – Celková intenzita slunečního záření dne 21.6., $Z=3$, $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $r=0,2$



Obrázek 7.7 – Celková intenzita slunečního záření pro charakteristické dny., $Z=3$, $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $r=0,2$

den	21.1.	20.2.	21.3.	21.4.	22.5.	22.6.	23.7.	23.8.	23.9.	23.10.	22.11.	22.12.
Výkon[W]	674	747	890	1005	1081	1118	1127	1108	1060	973	850	718

Tabulka 7.1 – Hodnoty maximálních výkonů v charakteristických dnech



7.8 – Stránka o celkové intenzitě slunečního záření z aplikace „Fotovoltaika“

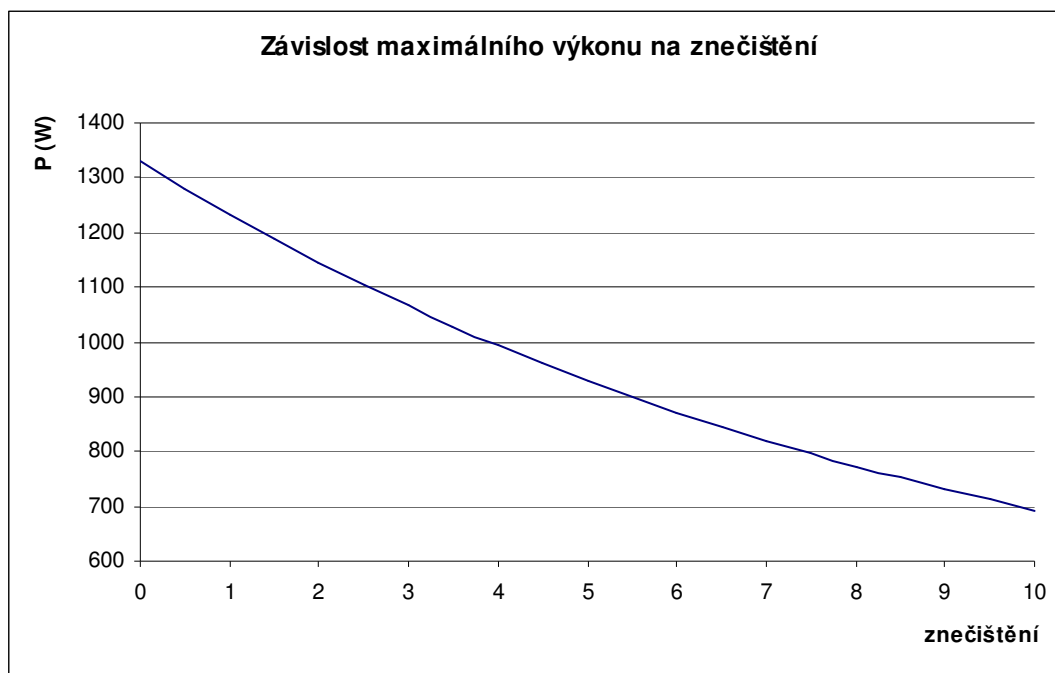
7.2.5 Výsledná energie v závislosti na albedu, znečištění a nadmořské výšce

V předchozích podkapitolách bylo ukázáno, jak vypadá intenzita slunečního záření v průběhu dne, kdy jsou podmínky simulace pevně nastaveny. Tj. jsou neměnné hodnoty znečištění, nadmořské výšky a albeda. V následujících grafech bude zobrazeno, jak se mění maximální výkon v jednom konkrétním dnu, pokud mu budou měněny výše zmíněné podmínky.

Z grafů (Obrázek 7.9, Obrázek 7.10 a Obrázek 7.11) je vidět, že změna albeda, znečištění a nadmořské výšky je na maximálním výkonu znatelná.

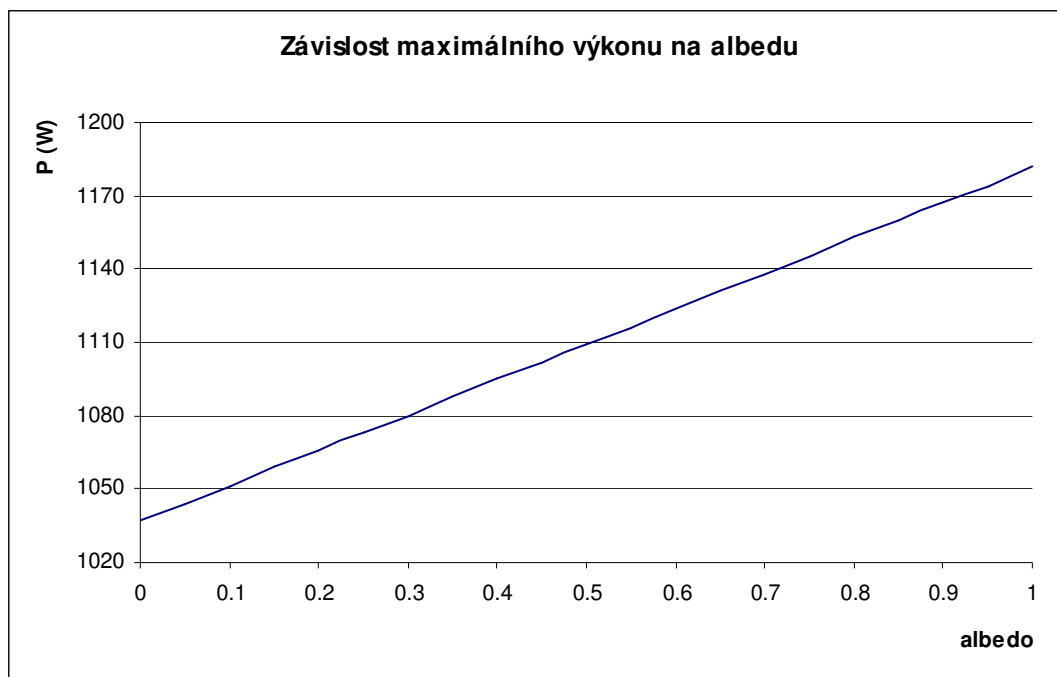
Při změně znečištění atmosféry se zvyšující hodnotou Z prudce snižoval maximální výkon. Z daného grafu je možné říci, že při vysokých znečištěních atmosféry se maximální dodávaný výkon dostává na polovinu v porovnání s neznečištěnou atmosférou. Pokud bychom však uvažovali reálně se vyskytující podmínky, kde se znečištění pohybuje mezi čísly 1 až 5, rozdíl výkonu je přibližně 25%, tj. na méně znečištěném místě lze dosáhnout o 25% vyšší maximální výkon než na místě znečištěném.

Při změně albeda od 0 do 1 se zvyšující hodnotou albeda zvyšoval výkon. U nulového albeda byl minimální a u albeda jedničkového byl maximální. V praxi je uvažováno albedo kolem hodnoty 0,2, takže jeho změna se může v běžných podmínkách pohybovat v rozmezí 0,1 až 0,3, ve kterém je zisk maximálního výkonu 3%.

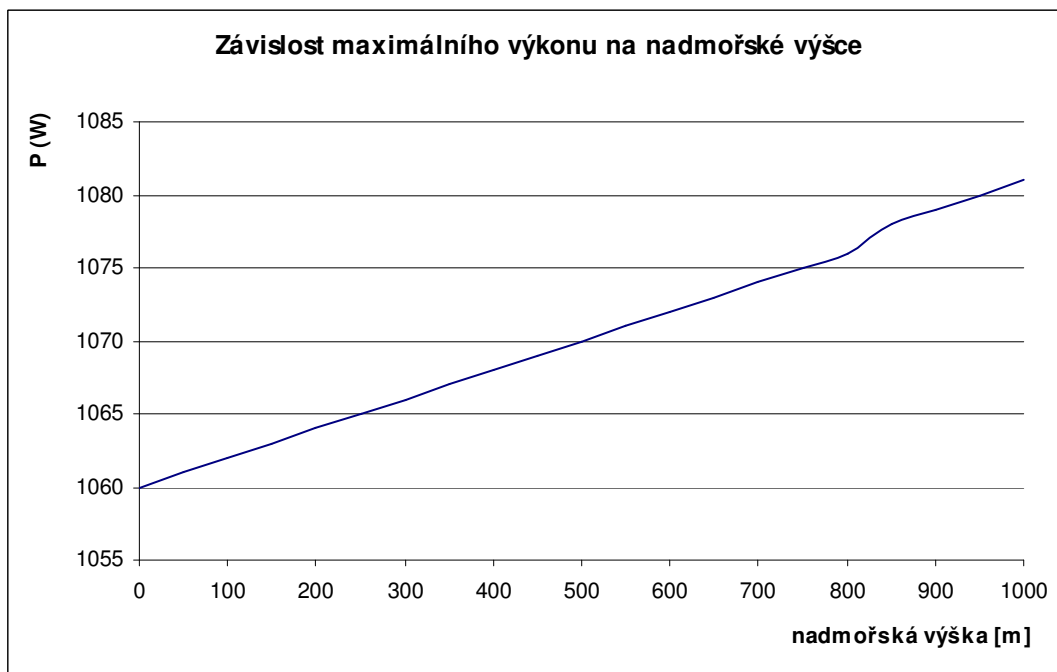


Obrázek 7.9 – Závislost maximálního teoretického výkonu na znečištění atmosféry dne 21.6., $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $r=0,2$, $H=300$

Při změně nadmořské výšky roste úměrně její hodnota maximálního výkonu. Tj. v nížinách má nejmenší hodnoty maximálního výkonu a ve vyšších polohách hodnoty vyšší. Při určení běžné nadmořské výšky použití fotovoltaiky lze určit interval 150 – 400m n.m. ve kterém je výškový procentuelní výkonový zisk 1%.



Obrázek 7.10 - Závislost maximálního teoretického výkonu na albedu dne 21.6., $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $Z=3$, $H=300$

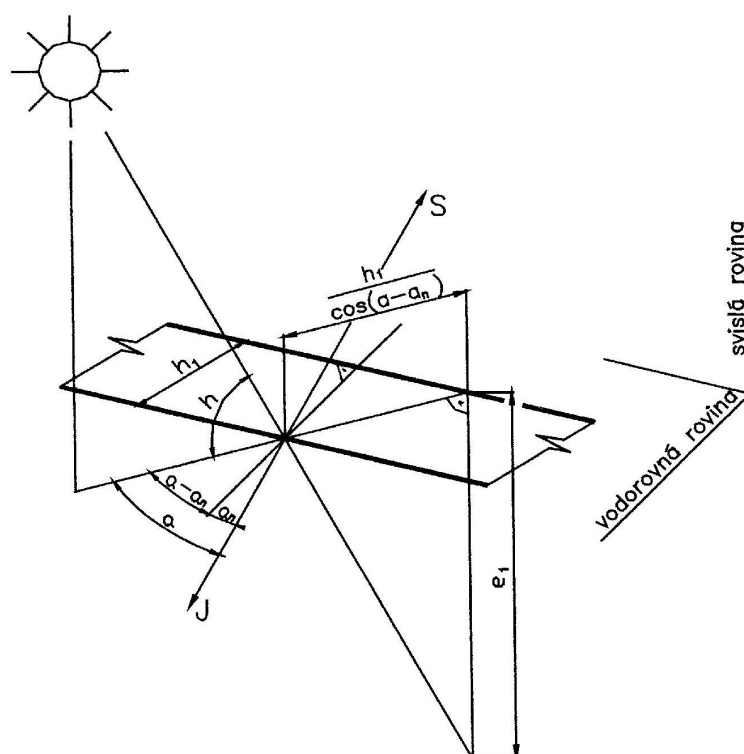


Obrázek 7.11 - Závislost maximálního teoretického výkonu na nadmořské výšce dne 21.6., $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $r=0,2$, $Z=3$

8 Princip stínění

Princip stínění je při řízení fotovoltaických panelů hojně využíván. Pokud je panel celý osvětlený, dodává předem stanovený výkon. Pokud je však panel zastíněn, pak se jeho výkon počítá pouze z té části panelu, která není zastíněna, zastíněná část dodává minimální výkon. Zmenší se tedy aktivní plocha, která je schopna vytvořit výkon. Tohoto efektu je využito v kapitole 11.3.2.1.

8.1 Délka stínu vrženého vodorovnou plochou



Obrázek 8.1 – Znázornění výpočtu délky stínu vrženého vodorovnou plochou

$$e_v = h_1 \cdot \frac{\operatorname{tg}(h)}{\cos(a - a_n)} \quad [\text{m}] \quad (8.1)$$

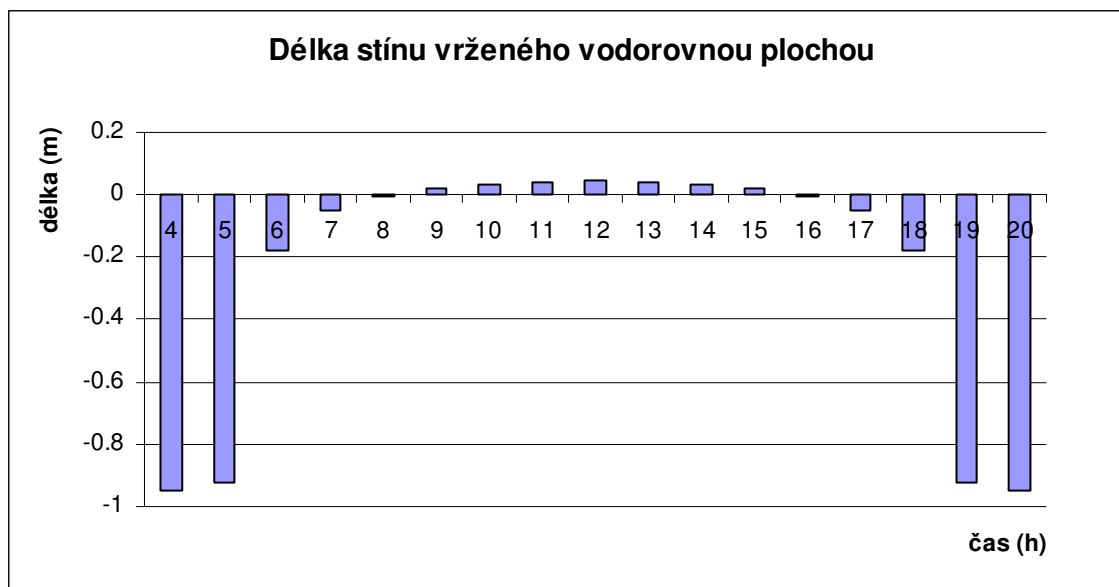
e_v – délka stínu [m]

h_1 – šířka vodorovné plochy [m]

h – výška Slunce na obzoru [°]

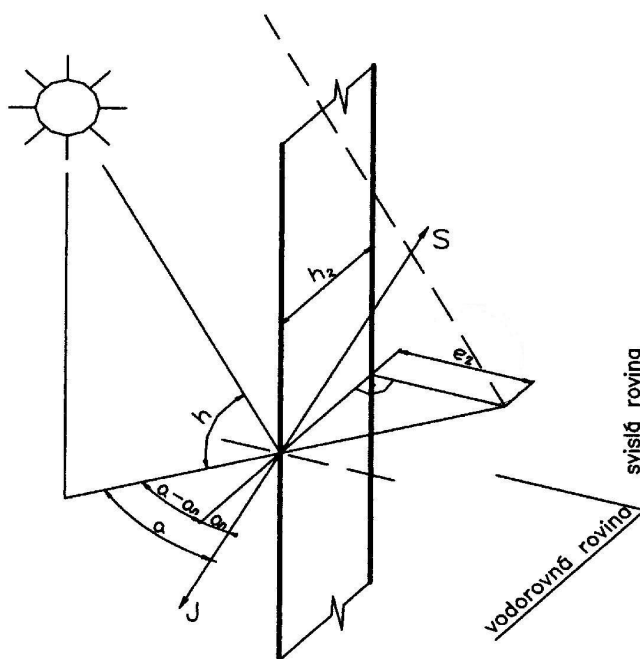
a – azimut normály [°]

a_n – odklonění azimutu od normály [°]



Obrázek 8.2 – Délka stínu vrženého vodorovnou plochou o šířce 15cm dne 21.6., $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$

8.2 Délka stínu vrženého svislou plochou



Obrázek 8.3 – Znázornění výpočtu délky stínu vrženého svislou plochou

$$e_s = h_2 \cdot \operatorname{tg}(a - a_n) \text{ [m]} \quad (8.2)$$

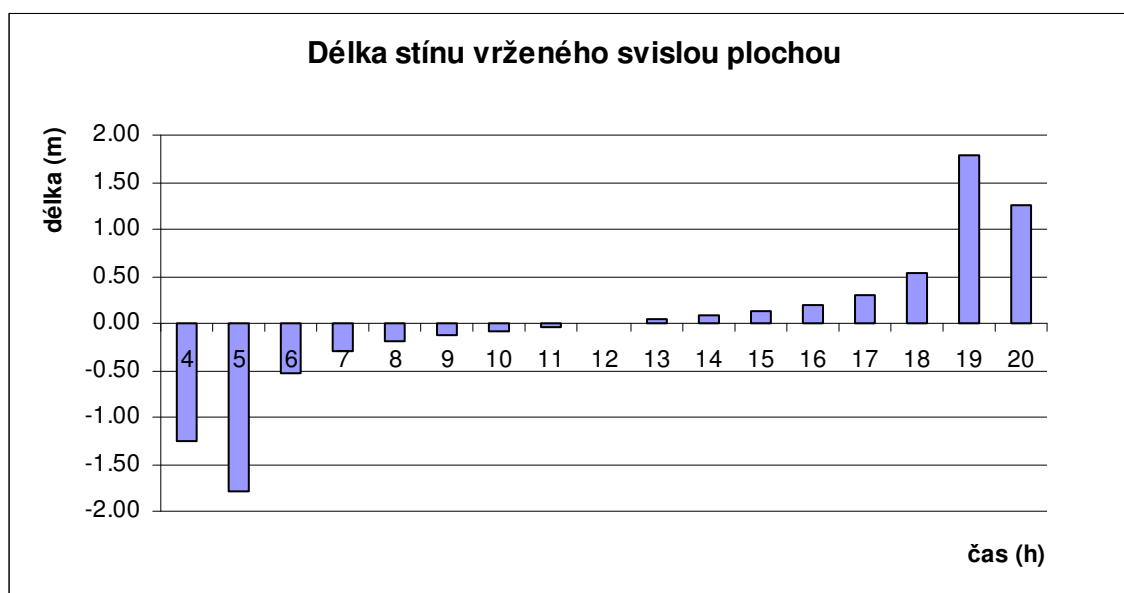
e_s – délka stínu [m]

h_2 – šířka svislé plochy [m]

h – výška Slunce na obzoru [°]

a – azimut normály [°]

a_n – odklonění azimutu od normály [°]

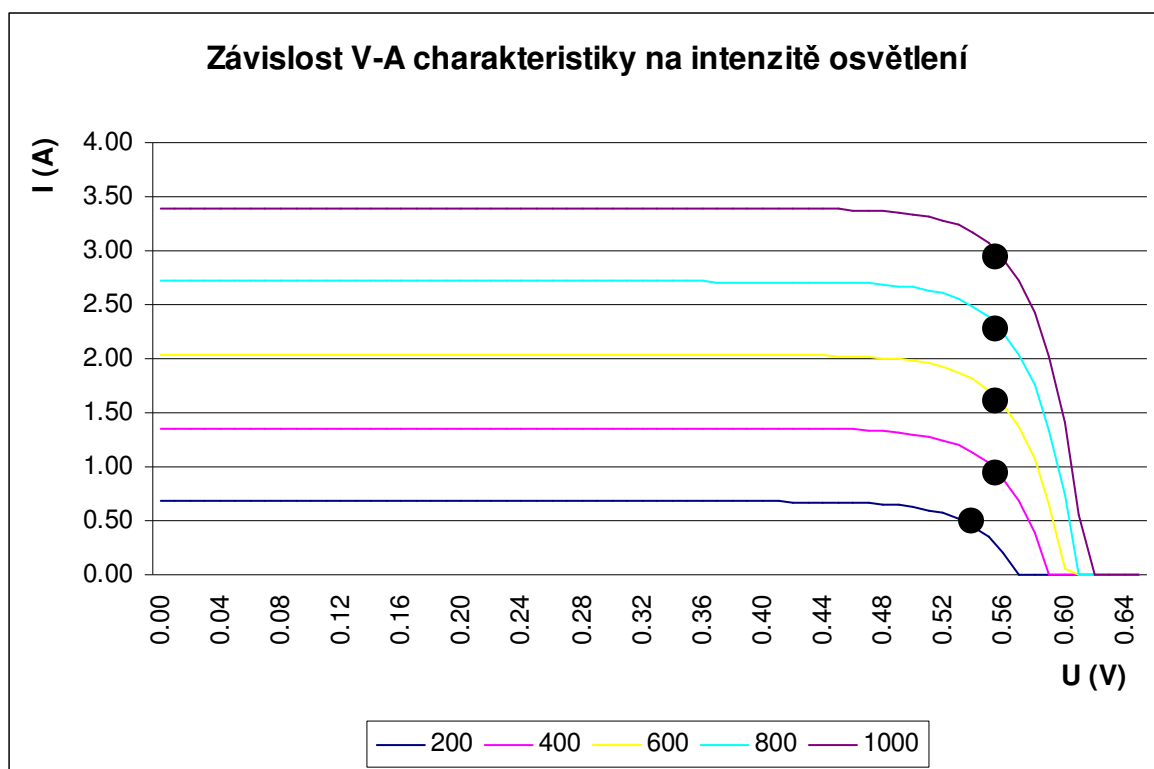


Obrázek 8.4 – Délka stínu vrženého svislou plochou o šířce 15cm dne 21.6., $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$

Princip stínění je znám od pradávna. Nejznámějším využitím stínu vrženého tyčkou jsou sluneční hodiny. Sluneční hodiny vodorovné i svislé využívají principu vrženého stínu na předem označenou destičku k určení „zimního“ času.

9 Nastavení bodu MPP

Bod MPP (Maximal Power Point), nebo v některých anglických literaturách uváděn jako PPP (Peak Power Point), je místo na V-A charakteristice fotočlánku, ve kterém je napětí a proud v takovém poměru, že je výkon článku největší. Tento bod bývá nastavován do tzv. „kolena diody“, kde se za mírně zvětšujícího proudu rapidně zmenšuje napětí. V-A charakteristika fotovoltaického článku je závislá na povětrnostních podmínkách, intenzitě osvětlení dopadající na článek a teplotě samotného článku. Jak je vidět z následujícího obrázku, při snižování intenzity osvětlení, klesá proud dodávaný panelem. Při zvyšování teploty klesá výkon panelu tak, že se “koleno“ charakteristiky posouvá doleva a tím se zmenšuje napětí na článku.



Obrázek 9.1 – A-V charakteristika fotočlánku pro různé intenzity osvětlení a ukázky MPP bodů (černé body)

9.1 *Princip MPP Trackeru*

Maximum Power Point Tracker (MPPT) je v podstatě mikroprocesorově řízený DC/DC měnič. MPPT se používá v solárních nabíjecích systémech ke zvýšení efektivity celého systému tím, že uzavírá vstupní napětí ze solárního panelu vůči výstupnímu napětí do baterie.

Fotovoltaické panely, které jsou konstruovány pro 12 V baterie generují největší výkon kolem napětí 17 V. Když je panel připojen přímo k baterii, baterie stáhne pracovní napětí směrem dolů ke 12 V.

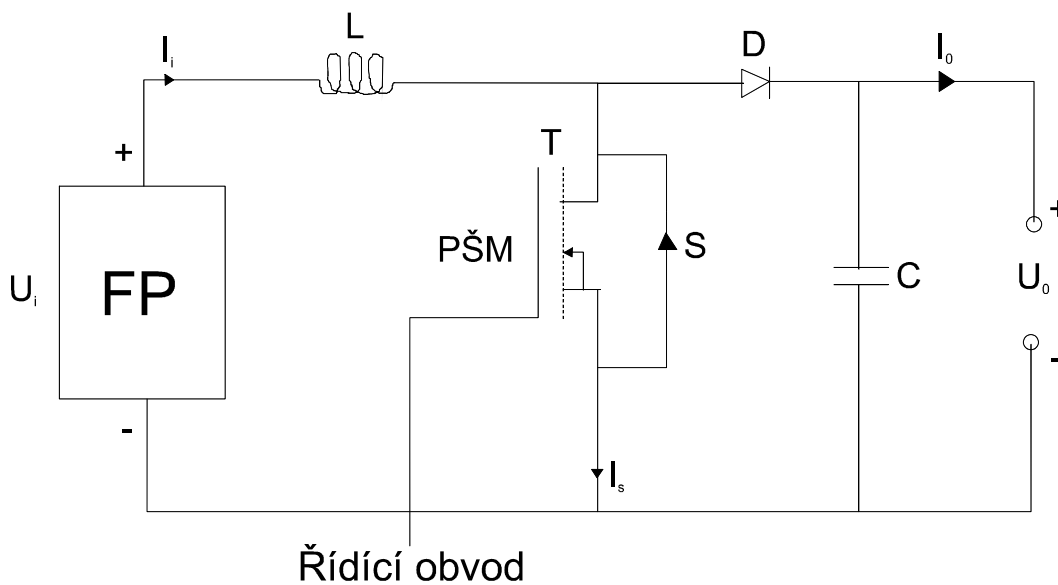
Použití DC/DC měniče pro připojení fotovoltaického panelu k baterii, umožní fotovoltaickému panelu pracovat s vyšším výstupním napětím, což je vlastně maximální výstupní výkon panelu (MMP), oproti přímému připojení k baterii.

Pokud je bod MPP pevně nastaven, je pak velmi snadné vytvořit DC/DC měnič s pevným převodním poměrem pro převod MPP napětí panelu na napětí baterie. Jakmile se však MPP změní, záleží potom na ozáření panelu slunečními paprsky a teplotě panelu. Poté je nutno použít mikroprocesor, který bude měřit výstupní napětí z fotovoltaického panelu a bude měnit konverzní poměr pro udržení fotovoltaického panelu na jeho MPP bodě.

DC/DC měnič je v podstatě kompenzační měnič, což znamená, že bere větší vstupní napětí a konvertuje je na nižší výstupní napětí. V tomto měniči se interně neztrácí energie, výjimkou jsou malé odporové ztráty. To znamená, že výstupní výkon je roven vstupnímu výkonu (vstupující wattů = vystupující wattů). Pak platí, že když výkon zůstává stejný a napětí poklesne, výstupní proud musí být vyšší než vstupní proud.

9.2 Algoritmus a schéma pro MPP Tracker

Většina MPP Trackerů využívá princip DC/DC konvertorů. Tato konverze je účelná, protože většina zařízení, která jsou konstruována pro použití v kombinaci s fotovoltaickým panelem je napájena 12/24 DC V. Tento DC/DC konvertor (Obrázek 9.2) pracuje nepřetržitě, ve vodivostním módu a je použit jako výkonová jednotka. Přepínač S je řízený pulsní šířkovou modulací s řídicí frekvencí 33kHz, která je generována řídicím signálem S_c z řídicího obvodu. Proudový tok je řízen vypínáním/zapínáním (poměru zaneprázdnění D) přepínače S (unipolární tranzistor).



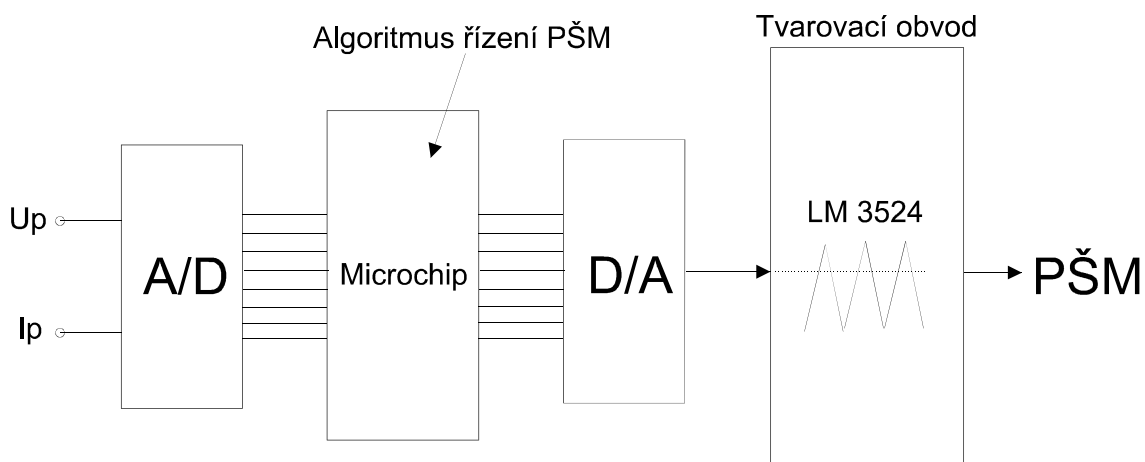
Obrázek 9.2 – Schéma MPPT pro nabíjení akumulátoru

FP – fotovoltaický panel

T – unipolární tranzistor

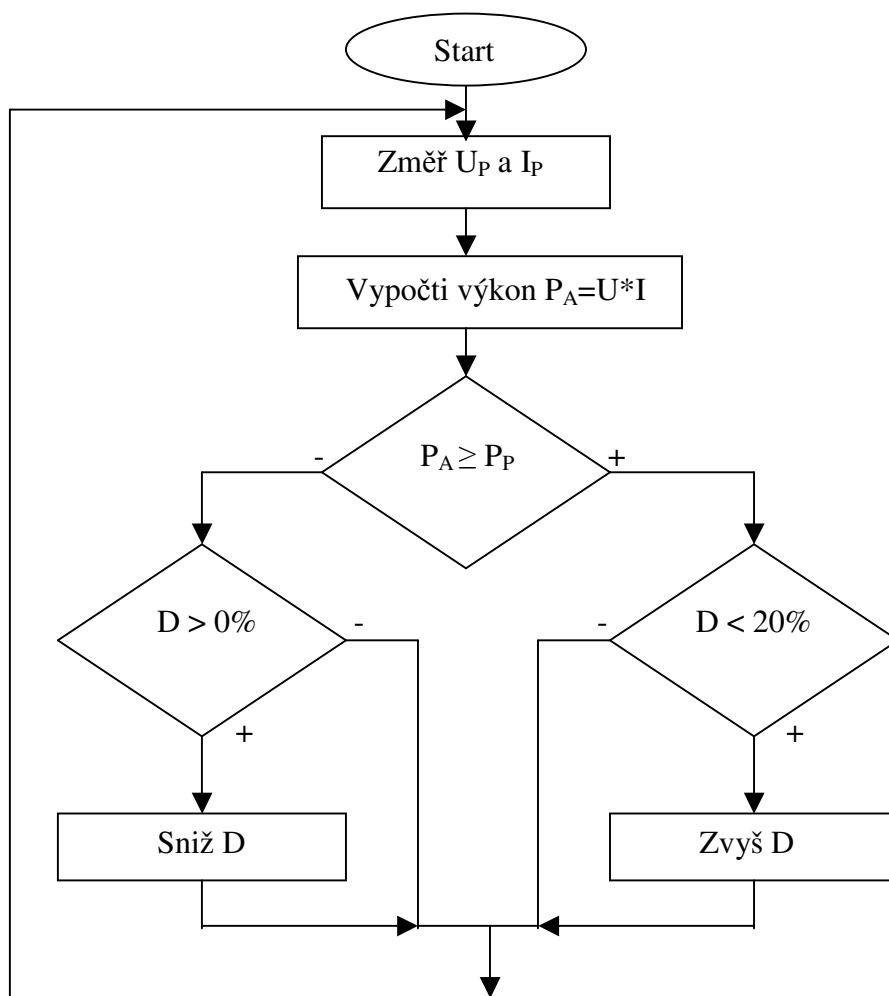
PŠM – pulsní šířková modulace

C – kondenzátor



Obrázek 9.3 – Diagram řídicího obvodu

Základem každého řízeného MPPT je mikroprocesor. Do tohoto mikroprocesoru přichází dva měřené signály, napětí a proud z fotovoltaického panelu. Z těchto hodnot je vypočítán výkon ($P=U \cdot I$) a porovnán s výkonem z předchozího výpočtu. Pokud je větší, než předchozí, a poměr zaneprázdnění D je menší než 20% potom se D zvýší. Pokud ne, tak se nic nestane a program se vrátí na začátek. Pokud je výkon menší a D je větší než nula, D se sníží. Takto se program cyklicky opakuje. Jako výchozí hodnoty jsou použity první měření napětí a proudu a $D = 0,1$. D se pohybuje v mezích $\langle 0,1 \rangle$.



Obrázek 9.4 – Diagram kontrolního algoritmu (Jancarle, Fernando, 2003)

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad [-] \quad (9.1)$$

t_{on} – doba, po kterou je signál pro PŠM (pulsní šířková modulace) zapnut

T – perioda pro zapnutí a vypnutí signálu PŠM ($T = t_{zap} + t_{vyp}$)

Nezbytné vzorce pro sestavení DC/DC konvertoru :

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (9.2)$$

$$\Delta I = \frac{V_i \cdot D}{f_s \cdot L} \quad (9.3)$$

$$\Delta V_c = \frac{I_0 \cdot D}{f_s \cdot C} \quad (9.4)$$

V_I – vstupní napětí do DC/DC konvertoru

V_0 – výstupní napětí z DC/DC konvertoru

f_s – spínací frekvence (33kHz)

ΔV_c – maximální změna napětí (např. 5%)

ΔI – maximální změna proudu (např. 20%)

D – poměr zaneprázdnění

(Jancarle, Fernando, 2003)

10 Příklad nastavení solárního panelu

Příklad nastavení fotovoltaického panelu bude proveden pro 7. červen pro 12 a 13 hodin, v zeměpisné délce 15° a šířce 50° . Bude také porovnána změna azimutu a výšky Slunce pro vypočtené časy.

den = 7, měsíc = 6, $\lambda = 15^\circ$, $\varphi = 50^\circ$

pro první výpočet je zvolen čas : $t = 12$ hodin

$$\tau_h = 30.3 \cdot (6 - 1) + 7 = 158.5$$

Sluneční deklinace:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin(158.5 - 109) = 17.83 [^\circ]$$

Výška Slunce nad obzorem:

$$h = \arcsin(\sin(50) \cdot \sin(17.83) + \cos(50) \cdot \cos(17.83) \cdot \cos(0)) = 57.83^\circ$$

Azimut Slunce:

$$a = \arcsin\left(\frac{\sin(0) \cdot \cos(50)}{\cos(57.83)}\right) = 0^\circ$$

Fotovoltaický panel by tedy v tento den a tuto hodinu měl být orientován přímo k jihu a jeho sklon od zemského povrchu by měl činit 57.83° , aby bylo zachyceno co nejvíce dopadajících slunečních paprsků, tedy získán největší výkon.

Pokud je zvolen čas $t = 13$ h je $T=15^\circ$, pokud není uvažována časová rovnice. Sluneční deklinace zůstává stejná, mění se jen výška Slunce nad obzorem a azimut Slunce.

Výška Slunce nad obzorem:

$$h = \arcsin(\sin(50) \cdot \sin(17.83) + \cos(50) \cdot \cos(17.83) \cdot \cos(15)) = 55.65^\circ$$

Azimut Slunce:

$$a = \arcsin\left(\frac{\sin(15) \cdot \cos(50)}{\cos(55.65)}\right) = 17.14^\circ$$

Pro čas o jednu hodinu větší než v předešlém výpočtu, se výška Slunce příliš nezmění, zato azimut Slunce je již o 17.14° posunut.

Z tohoto porovnání je zřejmé, že nejdůležitější pro řízení fotovoltaických panelů je správně nastavit azimut.

11 Způsoby řízení fotovoltaických panelů

Každý, kdo má zájem o používání panelů, se musí zamyslet zda a jakým způsobem bude tyto panely řídit. Pod pojmem řízení fotovoltaických panelů se rozumí celodenní směřování aktivní plochy tak, aby byla kolmo k dopadajícím slunečním paprskům. Je-li panel řízen správně, směřuje neustále kolmo ke Slunci, pak je možné získat z panelu největší výkon, který může panel v danou dobu a v daných povětrnostních podmínkách vyrobit ze Slunečního záření.

Existuje několik druhů řízení, které budou popsány v následujících kapitolách. Nejdůležitější věcí před samotnou realizací řízeného natáčení panelu je určit, v jaký osách budeme panel řídit a bude-li řízení pasivní, aktivní nebo ručně nastavované. Řízení lze provádět kolem vertikální osy, horizontální osy nebo kolem obou os. Nejčastěji se však realizuje natáčení pouze kolem jedné osy a to kolem osy vertikální. V následujících podkapitolách budou podrobně popsány způsoby, podle kterých lze panely řídit.

11.1 Ruční nastavení

11.1.1 S pevným úhlem sklonu

Ruční nastavení s pevným úhlem sklonu se nejčastěji používá na střechách budov, kde není třeba získávat maximum energie ze Slunce za každou cenu pomocí natáčení, ale postačuje výkon dodaný z pevně skloněného panelu.

Při nastavování pevného úhlu sklonu, který se nebude po celý rok měnit, je nutné přihlížet k tomu, že Slunce mění s ročními obdobími svou výšku nad obzorem. V zimních měsících je Slunce nízko nad obzorem a proto by měl být panel nastaven na velké úhly. V letních měsících je Slunce vysoko nad obzorem a panel by měl být nastaven na malé úhly. V následujících výpočtech bude určen úhel nastavení panelu pro jednotlivé měsíce v roce a bude určen nejlepší úhel pro fixní nastavení panelu.

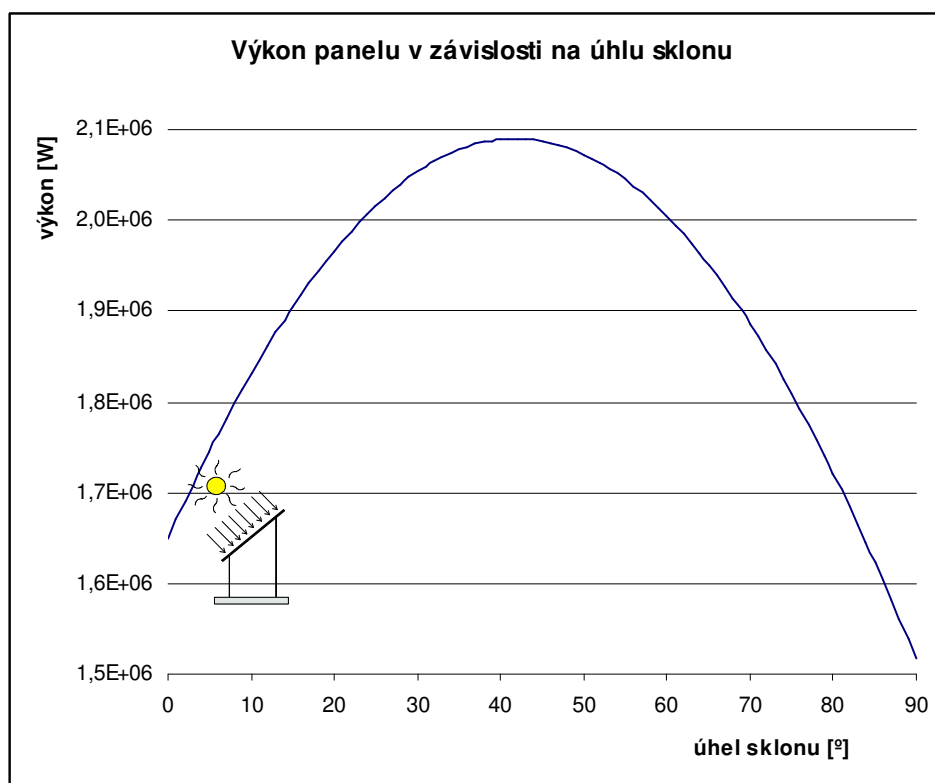
Pro určení nejlepšího úhlu pro fixní nastavení sklonu panelu bude sestavena rovnice ze vzorců v kapitolách 6 a 7, která bude vyjadřovat teoretickou energii panelu. Tato energie bude součet všech energií v jednotlivých dnech v roce. Proměnná v tomto výpočtu bude výška úhlu naklonění panelu. Tato proměnná bude postupně měněna v rozsahu $0^\circ - 90^\circ$ po jednom stupni. Výsledkem bude úhel, který je nejvýhodnější nastavit pro fixní panel.

Jako vstupní parametry do algoritmu vstupují:

$\lambda = 15^\circ$, $\varphi = 50.5^\circ$, $\alpha = 0..90^\circ$, $Z = 4$ (odpovídá pro město), $I_o = 1360\text{W}$, $r = 0.2$, $H = 300\text{m}$
(průměrná nadmořská výška pro ČR)

Zdrojový kód pro výpočet úhlu pro fixní nastavení panelu v matlabu:

```
clc;
clear all;
Io=1360;
H=300;
pi=3.1415;
fi=50*pi/180;
Z=3;
r=0.2;
for alfa=0:1:90
    Ic=0;
    for den=0:1:364
        delta=-23.5*cos(den*(360/365)*(pi/180))*(pi/180);
        Ip=0;
        Id=0;
        for T=-8:1:8
            h=asin(sin(fi)*sin(delta)+cos(fi)*cos(delta)*cos(T*15*(pi/180)));
            if h>=0
                a=asin((sin(T*15*(pi/180))*cos(delta))/cos(h));
                epsilon=9.38076*(sin(h)+sqrt(0.003+sin(h)*sin(h)))/(2.0015*(1-
                    H*10^(-4)))+0.91018;
                Ipn=Io*exp(-Z/epsilon);
                Iph=Ipn*sin(h);
                Idh=0.33*(Io-Ipn)*sin(h);
                cosgama=sin(h)*cos(alfa*pi/180)+cos(h)*cos(a)*sin(alfa*pi/180);
                Ipp=Ipn*cosgama;
                Ip=Ip+Ipp;
                Id=Id+0.5*(1+cos(alfa*pi/180))*Idh+0.5*r*(1-
                    cos(alfa*pi/180))*(Iph+Idh);
            end
        end
        Ic=Ic+Ip+Id;
    end
    I(alfa+1)=Ic;
    if alfa==0
        maximum=I(alfa+1);
        pozice_maxima=alfa;
    end
    if I(alfa+1)>=maximum
        maximum=I(alfa+1);
        pozice_maxima=alfa;
    end
end
maximum
pozice_maxima
plot(0:alfa,I)
ylabel('Teoretická energie sečtená za celý rok')
xlabel('Úhel sklonu panelu')
title('Závislost teoretického výkonu panelu na úhlu jeho sklonu')
```



Obrázek 11.1 – Závislost teoretického výkonu panelu za celý rok na úhlu jeho sklonu, $Z=3$, $\varphi=50^\circ$

Z předcházejícího výpočtu bylo zjištěno, že úhel pro fixní nastavení panelu je ideální v hodnotě $\alpha = 44^\circ$. Některé literatury uvádějí nastavení úhlu na 45° , toto nastavení je zřejmě myšleno obecně pro celou ČR a pro oblasti s různým znečištěním.

Bylo provedeno několik dalších výpočtů se změněnými parametry φ a Z , jehož výsledky ideálních úhlů jsou uvedeny v následující tabulce.

$\varphi \backslash Z$	1	2	3	4	5
48°	48°	45°	43°	41°	38°
49°	49°	46°	44°	41°	39°
50°	49°	47°	44°	42°	40°
51°	50°	47°	45°	42°	40°
52°	51°	48°	45°	43°	41°

Tabulka 11.1 – Ideální hodnoty úhlů sklonu panelu pro různé hodnoty Z a φ

Z předchozí tabulky je vidět, že se při změnách zemské šířky v rozmezí 2° a při zachování stejného faktoru znečištění se hodnoty ideálního úhlu sklonu mění v rozmezí $\pm 1^\circ$. Při zachování zemské šířky a změnách znečištění se již hodnoty ideálního úhlu měnily v rozmezí přibližně $\pm 5^\circ$.

11.1.2 S proměnným úhlem sklonu

Další ze způsobů nastavení sklonu panelu je jeho ruční změna podle ročního období. Používají se dva způsoby. První je nastavení panelu pro letní a zimní provoz, tedy pouze dvě polohy (dvě změny) a druhý je nastavení pro každé roční období, tedy čtyři polohy (čtyři změny).

11.1.2.1 Pro letní a zimní provoz

Nastavení panelu pro letní a zimní provoz vyžaduje, jak již bylo zmíněno v předešlém odstavci, dvě polohy nastavení sklonu panelu. První poloha je pro zimní období a druhá poloha je pro letní období. Protože v zimním období je Slunce nízko nad obzorem, budeme očekávat, že úhel nastavení pro zimní provoz bude velký. V letním období je Slunce vysoko nad obzorem a proto by měl být úhel náklonu panelu malý. Z následujícího algoritmu vychází dva úhly, jeden pro nastavení panelu v zimním období a druhý pro letní období.

Pro výpočet použijeme předešlý algoritmus, u kterého pouze změníme rozsah proměnné den na následující:

Pro letní období: for den=90:1:273

Tím zajistíme, že výpočet se bude provádět pouze pro měsíce duben, květen, červen, červenec, srpen a září.

Pro zimní období: a) for den=0:1:90

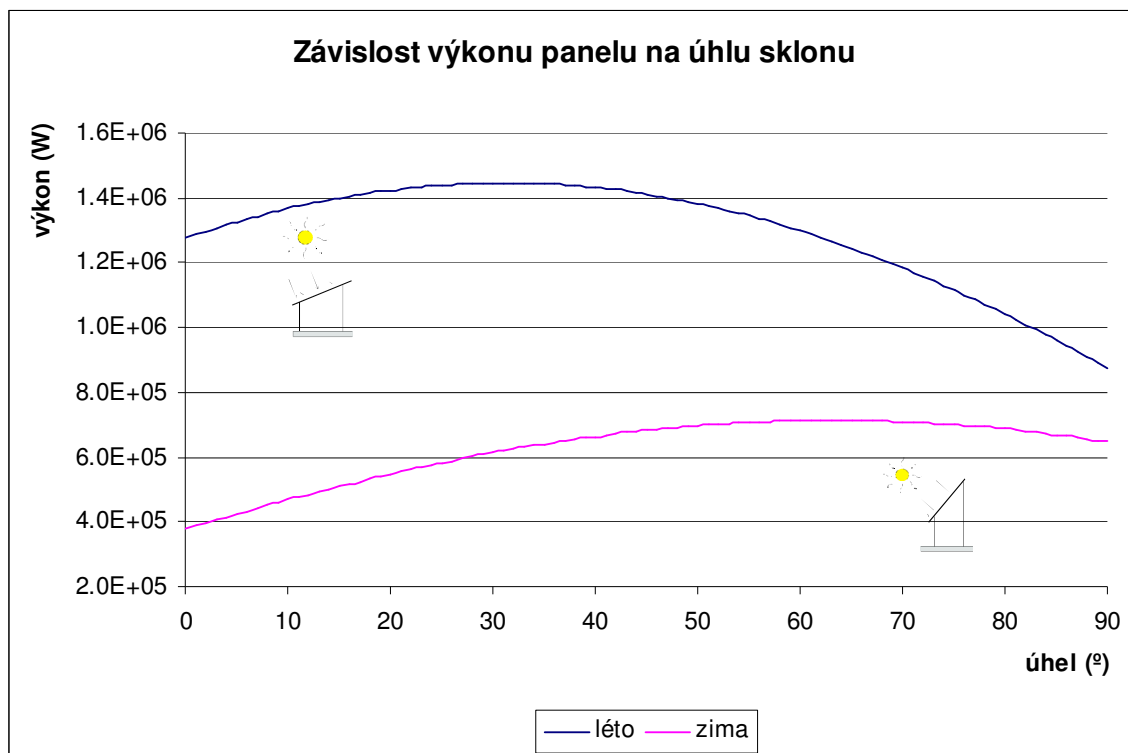
b) for den=274:1:364

Tím zajistíme, že výpočet se bude provádět pouze pro měsíce říjen, listopad, prosinec, leden, únor a březen.

Z výpočtu byla získána následující data pro úhly sklonu:

Pro letní období: $\alpha = 31^\circ$

Pro zimní období: $\alpha = 63^\circ$



Obrázek 11.2 - Závislost teoretického výkonu panelu na úhlu jeho sklonu pro letní a zimní provoz, $Z=3$, $\varphi=50^\circ$

11.1.2.2 Pro čtyři roční období

Pro nastavování sklonu panelu podle ročního období, jak již bylo řečeno na začátku kapitoly, existují 4 polohy sklonu. Pro jaro, léto, podzim a zimu. Úhly, pod jakými by měl být panel skloněn, budou opět vypočteny podle předešlého algoritmu. Změny v jeho struktuře budou opět pouze v rozsahu proměnné den a jsou následující:

Pro jaro: for den=60:1:151

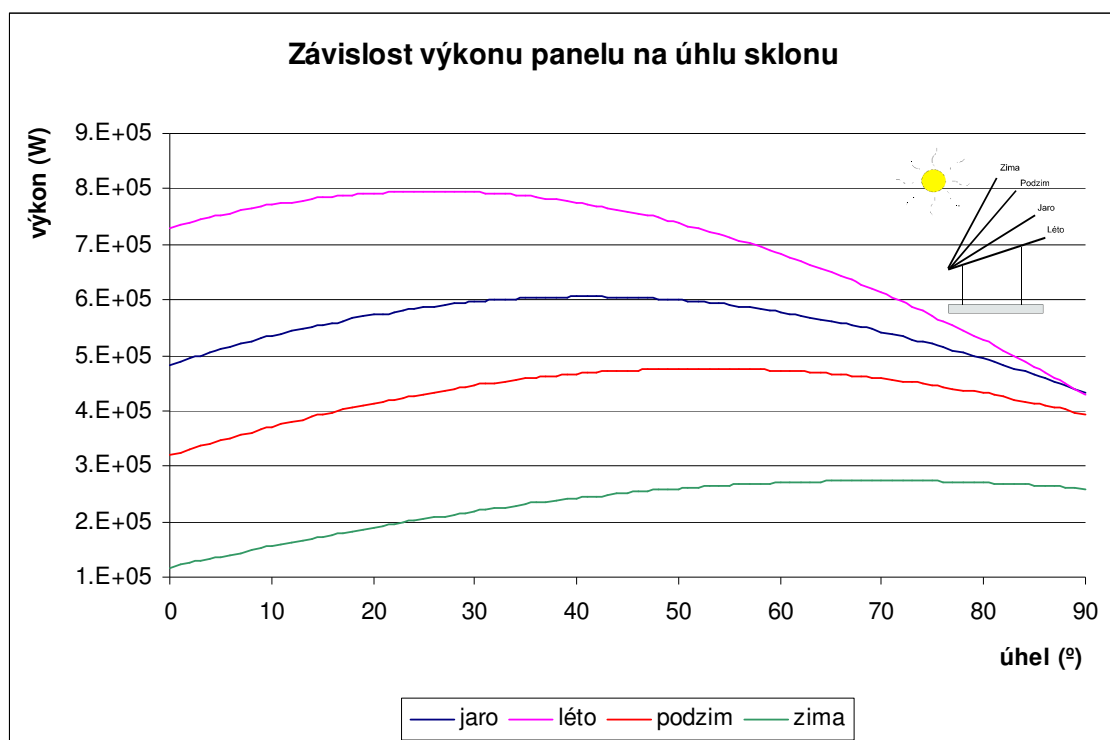
Pro léto: for den=152:1:243

Pro podzim: for den=244:1:334

Pro zimu: a) for den=335:1:364

b) for den=0:1:59

Roční období jsou počítány dle kalendářního rozdělení.



Obrázek 11.3 – Závislost teoretického výkonu panelu na úhlu jeho sklonu pro různá roční období, $Z=3$, $\varphi=50^\circ$

Z výpočtu byla získána následující data pro úhly sklonu:

Jaro: $\alpha = 41^\circ$

Léto: $\alpha = 26^\circ$

Podzim: $\alpha = 53^\circ$

Zima: $\alpha = 70^\circ$

11.2 Pasivní systémy

Pasivní systémy pracují na principu tepelné roztažnosti hmoty, nebo tvarové paměti kovů. Obvykle se skládají z dvojce proti sobě pracujících hnacích prvků, která je při stejné intenzitě ohřátí vlivem záření obou prvků silově vyvážena. Při nestejném osvětlení vzniká nerovnováha sil, která je využita k orientaci zařízení takovým směrem, ve kterém je dosaženo stejného osvětlení hnacích prvků a rovnováha sil je vyrovnána. Tyto typy jsou v porovnání s aktivními natáčecími systémy méně nákladné, ale pracují s menší účinností a při rozdílných teplotách ráno a odpoledne se vyskytují problémy se zpožděním natáčení.

11.2.1 Princip natáčení pomocí hydraulických válců

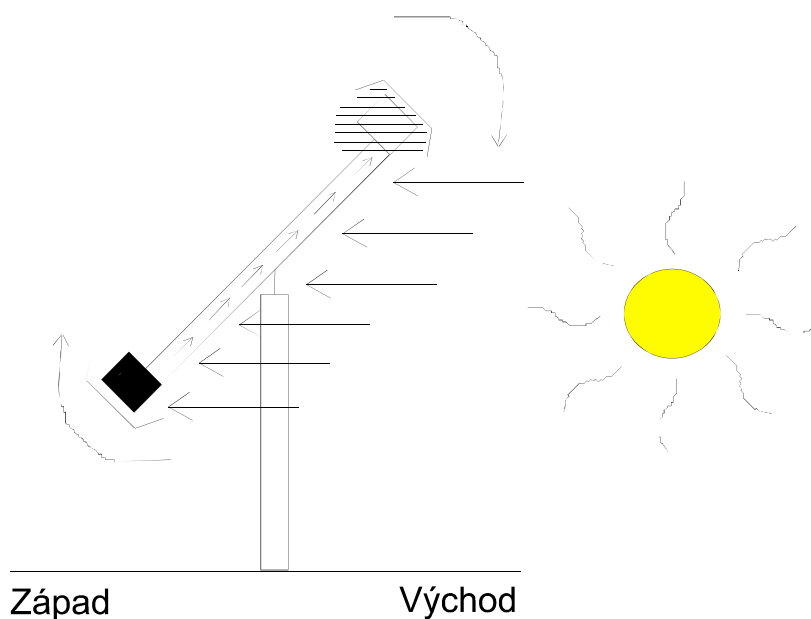
Pro natáčení fotovoltaických panelů kolem vertikální a horizontální osy jsou použity dva hydraulické válce. Oba dva válce jsou ohřívány slunečním zářením. Hydraulický válec, který je ohříván více, natáčí fotovoltaické panel do polohy směrem ke Slunci. Mění se tedy úhel naklonění fotovoltaického panelu od horizontální osy. V letních měsících se snižuje a v zimních měsících se úhel zvyšuje. (Olehla, 2002)

11.2.2 Princip natáčení pomocí rozdílných hustot teplé a studené kapaliny

Tento princip využívá rozdílnou hustotu teplé a studené kapaliny. Jako kapalinu lze použít například vodu, ale může být použita i jiná kapalina. Rozdíl hustot při různých teplotách kapaliny je vlastní hnací síla. Tento princip patří mezi nejjednodušší, nejspolehlivější a také k nejlevnějším druhům natáčecích systémů. Systém nemá žádný motor, ale jeho pohyb vzniká za pomoci dopadajících slunečních paprsků. Tato dopadající energie ohřívá dva zásobníky se stínícími deskami na každé straně panelu. Díky různé intenzitě ozáření válců se kapalina uvnitř ohřívá nerovnoměrně a proudí z teplejší části do studenější části zásobníku přes potrubí, které spojuje oba zásobníky. Tím je způsobeno přemístění těžiště celého systému a tím vyvození pohybu panelu do správné polohy. Tímto způsobem je panel vždy orientován kolmo ke Slunci. Večer je panel orientován směrem na západ. Ráno musí zásobník absorbovat takové množství tepla od slunečního záření, které je potřebné, aby se panel otočil zpět směrem k východu. Díky tomuto absorbování dochází v ranních a dopoledních hodinách ke zpožděnému natáčení.

Ohřev řídicí kapaliny je ovlivňován právě hliníkovými stínícími deskami. Když je jeden ze zásobníků vystaven více slunečnímu záření, než druhý, tlak páry se zvětšuje a

tlačí kapalinu do studenější, zastíněné části. Celý systém se natáčí až do doby, kdy jsou oba válce osvětleny rovnoměrně. V tomto okamžiku se celý systém zastaví, je natočen do správné polohy kolmo ke Slunci, a dá se do opětovného pohybu teprve tehdy, když bude jeden z válců opět více ozářen oproti druhému. Celý natáčecí cyklus je ukončen při západu Slunce a po celou noc zůstává ve stejném stavu, jako při západu Slunce. Do aktuální ranní polohy, směrem na východ, se nastaví až tehdy, když Slunce vyjde a začne zahřívat nerovnoměrně kapalinu ve válcích a tím vyvodí nastavení panelu do správné polohy. (Olehla, 2002)



Obrázek 11.4 – Ukázka nastavení panelu a naplnění válců kapalinou při východu Slunce

11.3 Řízení aktivními systémy

Aktivní natáčecí systémy obvykle pracují na principu elektrooptických čidel, většinou dvojic fotoodporů nebo fotovoltaických článků v antiparalelním zapojení. Při stejném osvětlení obou prvků je celý systém elektricky vyvážen. Při nestejném osvětlení čidel vzniká rozdílový signál, který je využit k pohonu natáčecí jednotky (většinou stejnosměrný motoru) a tím nastavení panelu takovým směrem, aby osvětlení obou čidel bylo stejné a tím nastala rovnováha. Ve stejném směru, jako jsou umístěna čidla je umístěn i samotný fotovoltaický panel. Při nastalé rovnováze na čidlech je panel nastaven přímo k dopadajícím slunečním paprskům a může dodávat maximální výkon.

11.3.1 Řízení dle času

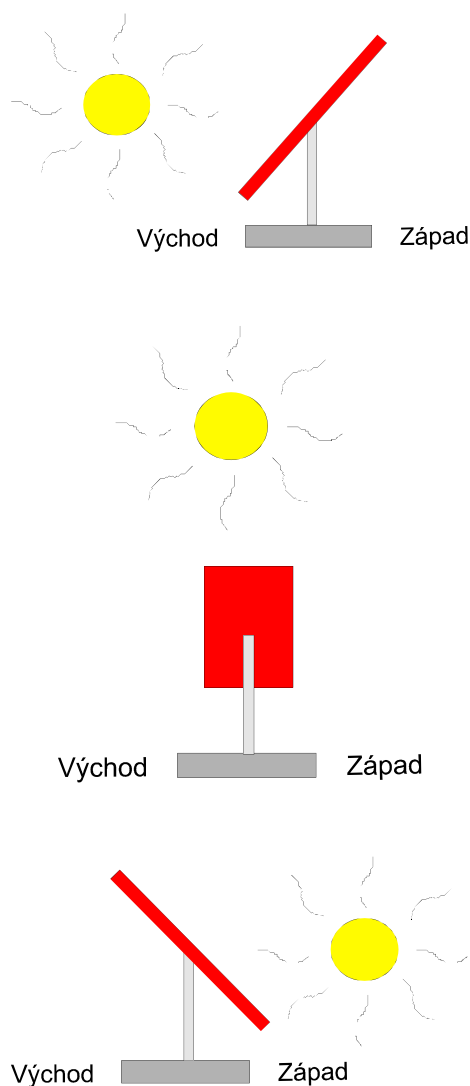
Řízené natáčení fotovoltaických panelů podle času je jedna z principiálně nejjednodušších metod. K tomuto druhu řízení stačí znát pouze způsob, jakým se pohybuje Slunce po obloze, kde je v určitou denní hodinu. K tomuto určení postačí znát výšku Slunce nad obzorem a jeho azimut. Důležitou věcí v řízení dle času je také východ a západ Slunce. Všechny tyto informace se dají jednoduše vypočítat dle vztahů uvedených v kapitole 6 (Geometrie pohybu Slunce). Pro tento druh řízení je nutné znát, snad v každém časovém okamžiku, polohu Slunce. K tomuto zjištění se používají počítače, nejčastěji mikrokontroléry nebo PLC. V řídicím počítači jsou v určitých intervalech vypočítávány hodnoty azimutu, výšky Slunce nad obzorem a východ a západ Slunce. Výpočet východu a západu Slunce je důležitý, aby řídicí systém věděl, od kdy má začít natáčet a do kdy má natáčet, nebo-li kdy má systém zapnout a kdy vypnout. Je to logické, neboť v noci, kdy Slunce nesvítí není nutno panel natáčet. Natáčení podle času se na rozdíl od natáčení od skutečné polohy Slunce nezastaví ve chvíli, kdy například Slunce zajde za mraky, ale pořád neúnavně sleduje jeho polohu, aby v okamžiku jeho vyjití z mraků byl celý systém v aktuální poloze a mohl tedy dodávat maximální výkon.

V některých dnech se však skutečná poloha Slunce liší od vypočtené a to až o 15 minut. Časový rozdíl skutečné a vypočtené polohy udává časová rovnice (viz. kapitola 6.2).

V této kapitole bude popsán základní princip pro natáčení panelu dle času a v kapitole 12 bude popsán skutečný model řízeného natáčení dle času.

11.3.1.1 Řízení v dle času v jedné ose

Pro řízení kolem jedné osy je nutné zvolit, kolem které osy se bude systém natáčet. Můžeme natáčet kolem vertikální a kolem horizontální osy. Jak bylo uvedeno v kapitole 10, při změně času o 1 hodinu se výška Slunce příliš nezmění, ale azimut Slunce se posune přibližně o 15° (záleží na datu a času). Proto je natáčení kolem horizontální osy nevýhodné. Avšak při natáčení kolem vertikální osy, kdy je sledován azimut Slunce a úhel sklonu panelu je fixně nastaven je řízení mnohem více efektivní. Pro fixní nastavení úhlu sklonu panelu mohou být použity úhly, které byly vypočteny v kapitole 11.1 – ruční nastavení. Může být použito pevné nastavení sklonu panelu, nebo proměnné nastavení podle ročních období, nebo na letní a zimní provoz. V praxi bývá nejčastěji využit princip fixního upevnění bez možnosti změny náklonu a tudíž úhel sklonu je 42° .



Obrázek 11.5 – Znázornění natáčení panelu kolem vertikální osy pro ráno, poledne a večer

11.3.1.2 Řízení dle času ve dvou osách

Pro řízení ve dvou osách je nutno již uvažovat jak azimut Slunce, tak též jeho výšku nad obzorem, nebo-li úhel, pod kterým je Slunce sledováno. Panel se otáčí kolem vertikální osy jako v případě při řízení v jedné ose (sleduje azimut Slunce) a také kolem horizontální osy, aby Sluneční paprsky dopadaly kolmo na aktivní plochu panelu (sleduje výšku Slunce nad obzorem).

V současné době jsou však náklady na pořízení jednotky pro nastavování panelu kolem horizontální osy vysoké v poměru k energii, která je tímto navíc získána. Proto se nejčastěji používá pouze horizontální dvupolohová nebo čtyř polohová regulace. Panel je pro zimní měsíce nastaven na 31° (Slunce je nízko nad obzorem) a pro letní měsíce je panel nastaven na 61° (Slunce je vysoko nad obzorem), nebo je nastavován sklon panelu pro každé roční období zvlášť (pro jaro/ 41° , léto/ 26° , podzim/ 53° i zimu/ 70° – výpočet proveden v kapitole 11.1.2.2).

11.3.2 Řízení dle skutečné polohy Slunce

Při řízeném natáčení fotovoltaického panelu podle skutečné polohy Slunce je nutné, aby systém obsahoval aktivní snímací prvky, které dokáží přesně identifikovat, kde se v danou chvíli Slunce nachází. Musí také obsahovat řídicí jednotku, která vyhodnocuje údaje získané ze snímacích prvků. Tyto signály zpracuje a podle jejich velikosti zvolí vhodný řídicí signál, který je poslán k motoru, který otáčí celým systémem tak, aby byla aktivní plocha fotovoltaického článku kolmo k dopadajícímu záření. Aktivní snímací prvky mohou být například fotodiody, malé fotovoltaické panely, fotoodpory nebo další aktivní prvky, citlivé na dopadající sluneční paprsky. Existuje mnoho způsobů, kterými lze řešit vyhodnocování signálů z řídicích prvků. V následujících kapitolách bude uvedeno několik základních způsobů, od nichž se bude většina následujících způsobů odvíjet. Bude vysvětlen základní princip natáčení a v kapitole 13 bude popsán realizovaný model řízení dle skutečné polohy Slunce.

11.3.2.1 Řízení s pomocí vrženého stínu na snímací prvky

Při řízení pomocí vrženého stínu na snímací prvky bude využíván princip stínění, jenž je uveden v kapitole 8. Princip vrženého stínu na aktivní plochu je znám snad každému po celém světě. Pokud však stín dopadne na aktivní plochu snímače (dioda nebo fotovoltaický panel), potom se výkon, který tato jednotka dodává na svůj výstup, sníží. Toto snížení bude úměrné zastíněné ploše. Čím více bude aktivní plocha zastíněna, tím menší výkon bude dodávat. Tohoto principu lze velmi snadno využít pro řízené natáčení fotovoltaických panelů. V následujících podkapitolách budou pro vysvětlení použity jako aktivní snímací prvky malé fotovoltaické panely a pro porovnání konstrukce i fotodiody. Tento způsob je podstatně složitější než zmíněný princip slunečních hodin.

11.3.2.1.1 Řízení v jedné ose s pomocí vrženého stínu na snímací prvky

Pro řízení v jedné ose postačí jen dvě snímací jednotky, které budou umístěny v určité malé vzdálenosti vedle sebe.

Fotodiody jako aktivní snímač:

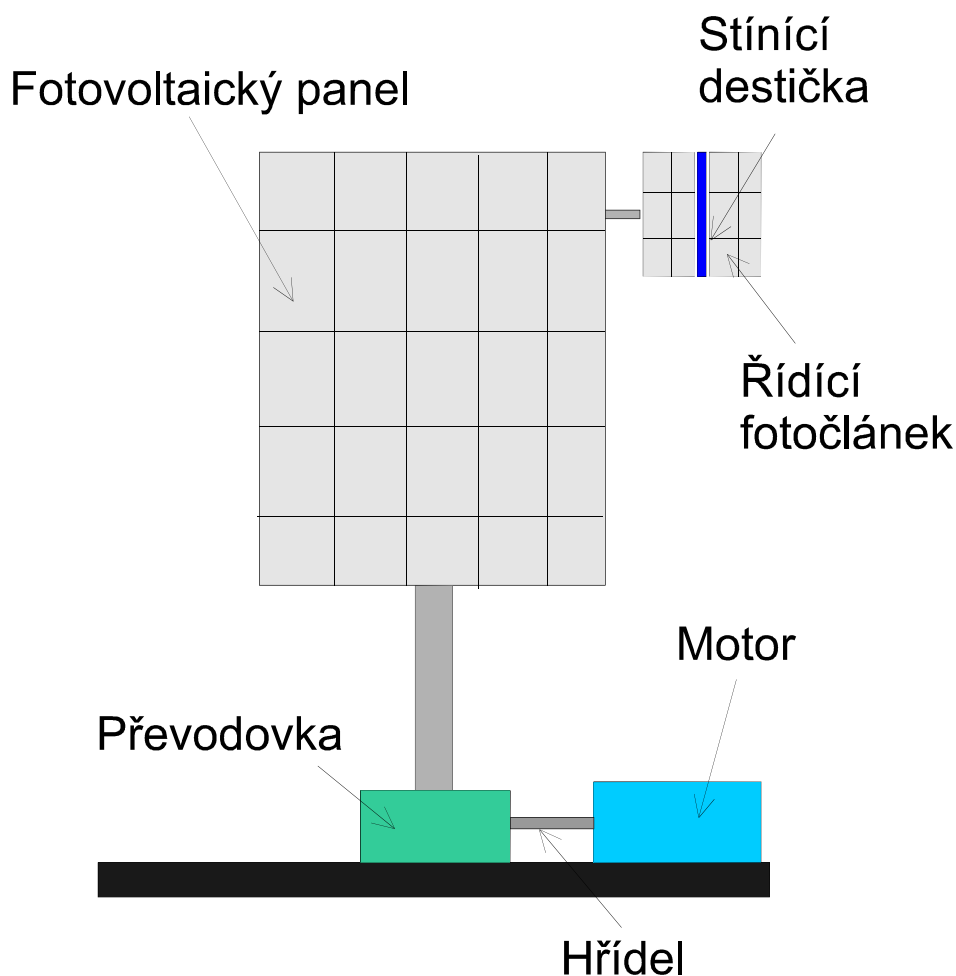
Dvě fotodiody jsou umístěny na otočné ploše společně s fotovoltaickým panelem. Pro správnou funkci musí být jedna z diod zakryta tak, aby vznikla malá štěrbina, kterou se dopadající sluneční záření dostane k její aktivní ploše pouze v okamžiku, kdy je dioda nastavena přímo ke Slunci. V opačném případě na její aktivní plochu dopadá pouze

minimum slunečních paprsků a napětí na jejím výstupu je nepatrné. Oproti tomu je druhá dioda nezakrytá. Proto dodává po celou dobu maximální napětí, které může vyrobit při dopadu slunečního záření na její aktivní plochu. Pokud je napětí na obou diodách stejné, pak řídicí systém rozpozná, že jsou diody natočeny přímo ke Slunci a tím i fotovoltaický panel. Pokud je na zakryté diodě menší napětí než na nezakryté, řídicí systém identifikuje, že panel není přímo natočen ke Slunci. Jeho řídicí jednotka pak vyšle signál k motoru, který celý systém pootočí do polohy, kde je již napětí na obou fotodiodách stejné.

Malé fotovoltaické panely jako aktivní snímač:

Použití fotovoltaických panelů jako aktivních snímačů je snazší než s pomocí fotodiod. Princip jejich instalace je následující: dva malé fotovoltaické panely se umístí těsně vedle sebe na výšku a mezi ně se na výšku vloží stínící destička. Panely se upevní vedle řízeného fotovoltaického panelu. Pokud je fotovoltaický panel natočen ke Slunci, jsou i řídicí panely natočeny ke Slunci. Pokud je však panel vychýlen ze směru přímého ke Slunci, destička, která byla vložena mezi malé fotovoltaické panely, začne vrhat stín na jeden z nich. Tímto zastíněním panelu se tedy zmenší jeho osluněná plocha a dodává proto menší výkon než panel, na který není stín vržen. Princip se tedy v podstatě neliší od principu fotodiod. Má však jednu výhodu. U fotodiod chyběla informace o tom, na kterou stranu je potřeba panel otočit, aby byl natočen přímo ke Slunci. Zřejmé bylo jen to, že je potřeba ho otočit, ale informace o směru zcela chyběla. Při použití fotovoltaických panelů pro snímání je problém s určováním směru vyřešen automaticky. Při pohybu Slunce na jednu nebo druhou stranu od řízeného panelu, se vždy na jednom z řídicích panelů vytvoří stín a tím se zmenší dodávaný výkon. Tato vlastnost řídicího systému je poté jednoduše využitelná při řízeném natáčení. Jednoduše se vyhodnotí, který z řídicích panelů má menší napětí a podle toho se začne motor otáčet.

Obě uvedené metody v podstatě sledují azimut Slunce, jenž je uveden v kapitole 0.



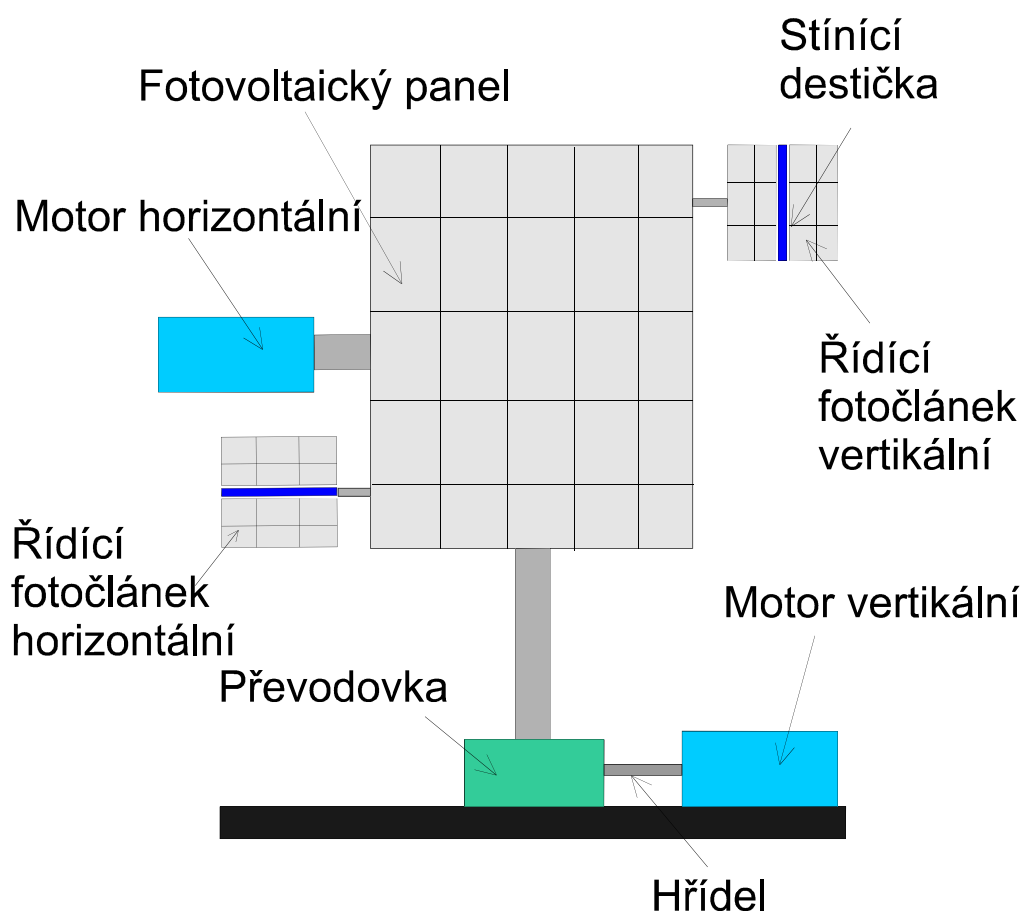
Obrázek 11.6 – Schematické znázornění připevnění řídicího panelu k řízenému systému pro vertikální řízení

11.3.2.1.2 Řízení ve dvou osách s pomocí vrženého stínu na snímací prvky

Při řízení ve dvou osách není vhodné používat fotodiody. Řízení pomocí nich by nebylo jednoduché. Z toho důvodu je výhodné použít malé fotovoltaické panely v obdobném uspořádání jaké bylo využito v předchozím případě a stínící destičky budou vloženy mezi dvojici fotovolatických panelů vertikálně a horizontálně. Jedna dvojice bude nastavovat řízený panel kolem vertikální osy a druhá dvojice bude panel stejným způsobem nastavovat kolem horizontální osy. Pro řízení kolem vertikální osy musí být stínící destička vložena mezi řídicí panely vedle sebe a při řízení kolem horizontální osy musí být stínící destička vložena mezi řídicí panely za sebou. Při umísťování řídicích destiček k řízenému panelu je výhodné umístit řídicí dvojici pro horizontální otáčení a pro vertikální otáčení na opačné strany řízeného panelu, aby nedocházelo jejich vzájemnému ovlivňování stínícími destičkami. Tímto způsobem lze efektivně nastavovat fotovoltaický panel do žádané polohy. Nastavení je vlastně dvoukrokové: nejdříve se nastavují

vertikální osa (neboli azimut) a poté horizontální osa (výška Slunce). Je také možné nastavovat panel současně v horizontální a vertikální ose. Vše záleží na samotné realizaci řízení.

Při těchto druzích řízení však může nastat problém, nerozpoznání západu Slunce. Ráno pak z tohoto důvodu může dojít ke značnému zpoždění natáčení. Při použití stínící destičky, která dokáže dobře odrážet sluneční paprsky (například hliníková), se tento problém eliminuje. Sklon destičky, aby vrhala správný stín na řídicí panely, napomůže rannímu natočení do správné polohy. Paprsky odražené dopadnou na jeden řídicí panel a ten systém ihned natočí do správné polohy.



Obrázek 11.7 – Schematické znázornění připevnění řídicích panelů k řízenému systému

11.3.2.2 Řízení s pomocí přídavného oboustranného fotovoltaického panelu

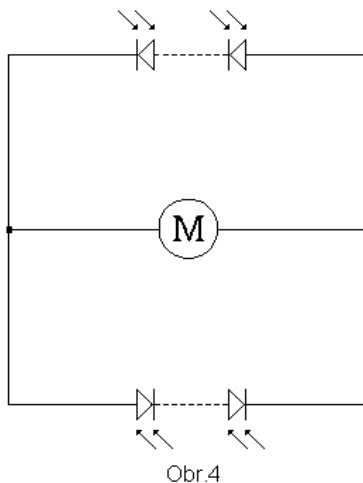
Tato nová a mimořádně jednoduchá konstrukce řízeného natáčení fotovoltaických panelů je patentovaná v ČR a v dalších průmyslových zemích firmou Poulek Solar, s.r.o. Pracuje se dvěma pomocnými fotovoltaickým panely připojenými přímo k pohonnému elektromotoru. Na následujících obrázcích je zobrazeno zařízení pro orientaci kolektoru solární energie. Toto zařízení se skládá z hlavního fotovoltaického článku a pomocného fotovoltaického článku, které jsou zapojeny antiparalelně, jsou rovnoběžné a mají přibližně stejné parametry (při výrobě nelze zaručit úplně stejné parametry). Články jsou připojeny k reverzibilnímu stejnosměrnému motoru, který je umístěn v duté rotační ose zařízení a je opatřen samosvorným převodem. Fotovoltaické články jsou připevněny k rotační ose zařízení, přičemž jejich rovina je odchýlena od roviny kolmé k fotovoltaickému článku a rovnoběžné s rotační osou zařízení o úhel β přibližně 20° k východu. Funkce zařízení s touto konfigurací je následující.

Před východem Slunce je zařízení orientováno k západu. Je tedy v poloze, ve které ukončilo činnost večer předešlého dne. Po východu Slunce dopadá sluneční záření na pomocný fotovoltaický panel připojený k motoru. Motor, napájený pomocným fotovoltaickým panelem, otáčí celým zařízením za Sluncem k východu. Celé natáčení se provádí, dokud se úhel β slunečních paprsků dopadajících na pomocný sluneční článek nezmenší natolik, že síla motoru napájeného pomocným fotovoltaickým panelem poklesne pod prahovou sílu potřebnou pro orientaci zařízení. Zařízení využívá záporné zpětné vazby. Zařízení je poté orientováno přibližně k východu. Slunce postoupí na obloze o úhel 2β směrem k západu. V tomto úhlu kolektory solární energie nesledují Slunce, neboť síla motoru je menší než síla potřebná k jejich orientaci. Při dalším postupu směrem k západu dopadá sluneční záření na sluneční článek připojený k motoru. Motor, napájený fotovoltaickým panelem, otáčí zařízení k západu za Sluncem, dokud se úhel β slunečních paprsků dopadajících na fotovoltaický panel nezmenší natolik, že síla motoru napájeného slunečním článkem poklesne pod prahovou sílu potřebnou pro orientaci kolektoru.

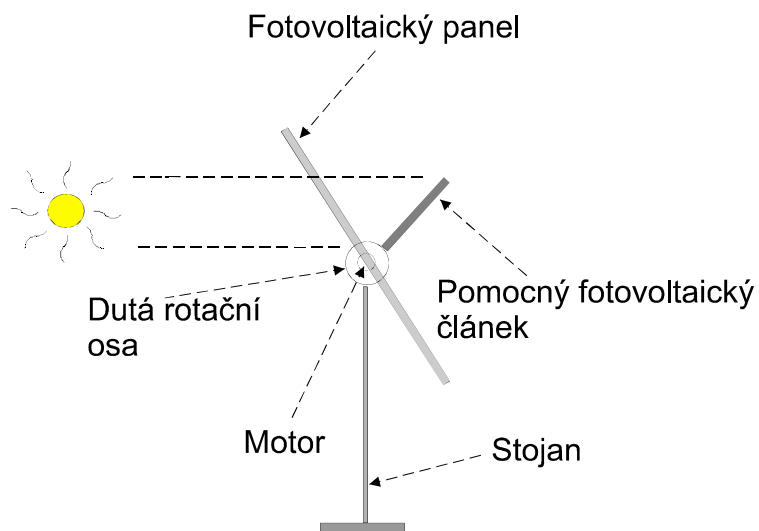
Při převažujícím přímém slunečním záření je přesnost sledování Slunce potřebná pro zachycení maximálního množství sluneční energie cca $\pm 10^\circ$. Při převažujícím difúzním slunečním záření je přesnost sledování Slunce potřebná pro zachycení maximálního množství sluneční energie cca $\pm 30^\circ$. V limitním případě při zatažené obloze a při výhradně difúzním slunečním záření není sledování Slunce potřebné.

Připojení elektromotoru přímo ke slunečním článkům bez dalších elektronických obvodů zvyšuje spolehlivost zařízení. (www.solar-trackers.com)

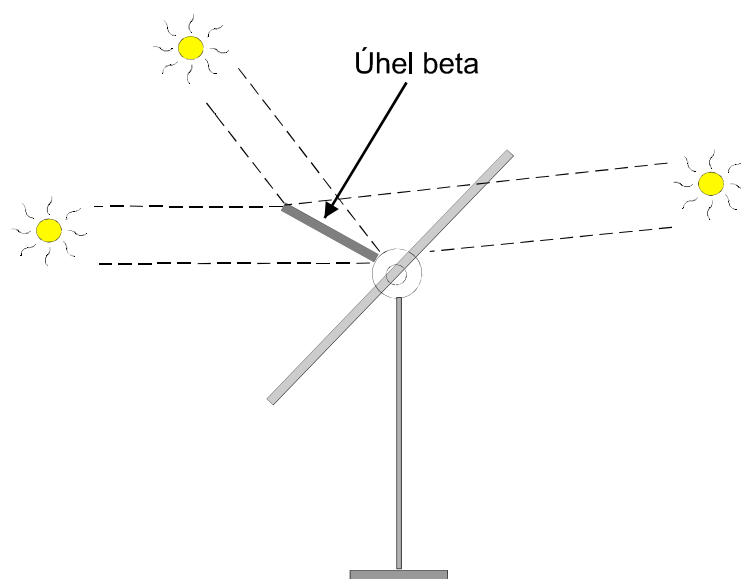
Schéma zapojení je na následujícím obrázku.



Obrázek 11.8 – Připojení pomocných fotovoltaických článků k motoru



Obrázek 11.9 – Schéma principu ovládání pomocným článkem



Obrázek 11.10 – Ukázka různých úhlů dopadajících paprsků na pomocný článek

Úhel β způsobí, že řídicí systém reaguje v již ranních hodinách díky vyklonění řídicího panelu. Tím je zaručeno natočení systému v ranních hodinách do správné polohy, ale také zmenšení výkonu dodaného panelem.

12 Laboratorní model řízeného natáčení fotovoltaických článků dle času

Laboratorní model řízeného natáčení fotovoltaických článků, který je v této kapitole popisován, vznikl za podpory grantu FRVŠ 2308/2005, za jehož finančního přispění mohla být realizována navržená konstrukce. Tento model je praktickou ukázkou možnosti řízení dle času a to řízeného natáčení kolem jedné osy (vertikální) s možností horizontálního ručního nastavení.

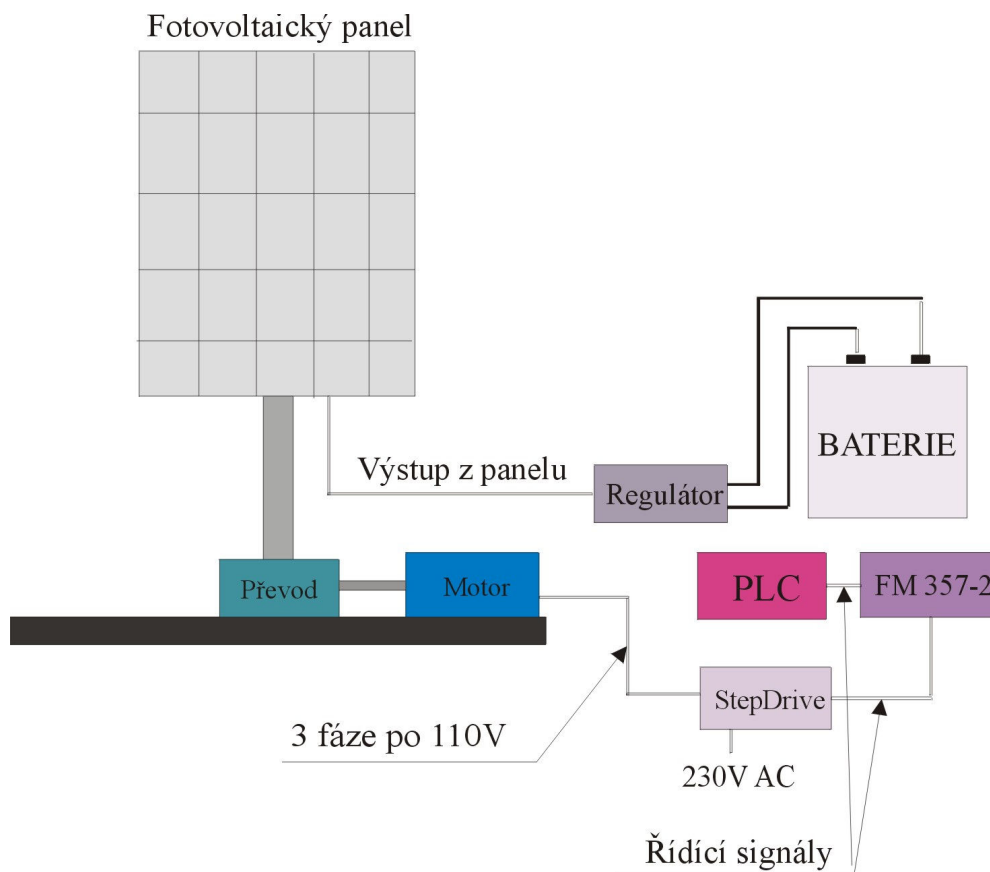
12.1 Hlavní použité součásti

- Napájecí zdroj 230V / 24V
- PLC Siemens S7-300 CPU 314IFM (řídící jednotka)
- Řídící jednotka pro krokový motor FM 357–2 od firmy Siemens
- Výkonová jednotka pro krokový motor FM StepDrive od firmy Siemens
- Krokový motor od fy. Siemens (11Nm)
- Solární panel SolarMaster 26W od firmy Solartec
- Regulátor nabíjení a vybíjení baterie
- Baterie Varta 12V / 50Ah
- Otočný rám s úchyty pro solární panel
- Dřevěná základní deska pro připevnění motoru, otočného rámu a baterie

12.2 Princip modelu řízení dle času

Základní princip pro toto řízení je již zmiňován v předchozích kapitolách. Vychází se z faktu, že pohyb Slunce po obloze se dá velice dobře popsat matematickými rovnicemi. Pro řízení tohoto modelu je třeba znát časy východu a západu Slunce společně s hodnotou azimutu Slunce. Výška Slunce nad obzorem, jak by mohlo být na první pohled zřejmé, není pro řízení kolem vertikální osy potřeba. Ale opak je pravdou. Právě výpočet azimutu je na výšce Slunce závislý a proto musíme počítat všechny potřebné údaje pro samotné nastavení panelu ke Slunci. Základem celého řídicího algoritmu je přesný čas. Tento čas byl v tomto modelu zaručen programovatelným automatem, ve kterém je také uložen celý řídicí algoritmus pro natáčení systému. Pomocí tohoto času jsou při každém cyklu v PLC vypočteny potřebné údaje pro natočení systému, tj. Sluneční deklinace, výška Slunce nad obzorem, azimut Slunce a v neposlední řadě východ a západ Slunce.

Tyto vypočtené hodnoty jsou řídicím algoritmem zpracovány a celý systém je natočen do polohy, která byla systémem vypočtena, tj. směrem ke Slunci. Způsob, jakým jsou vypočtená data zpracována, se zabývá část „Řídicí algoritmus“.



Obrázek 12.1 – Konstrukční schéma řízeného modelu

12.3 Konstrukční popis modelu řízení dle času

Jak již bylo zmíněno, tento model je pouze laboratorní a níže uvedené konstrukční řešení je nutno přizpůsobit modelu, který by byl pevně umístěn na povětrnostních podmínkách, tj. musel by odolávat poryvům větru, dešti a znečištění. Zde popisovaný model byl konstruován za účelem ověření funkčnosti navrhnutého řešení a také pro porovnání tohoto způsobu řízení s ostatními způsoby.

Základem celého modelu je otočný systém, který se skládá z osy zasazené do základní desky. Aby byla osa schopná otáčení, je uložena ve dvou ložiscích. První je umístěn na desce a je radiálně-axiální a druhé je umístěno ve dvou třetinách osy a je pouze radiální. Spodní ložisko je uloženo v pouzdře, druhé je také uloženo v pouzdře, avšak menším, ke kterému jsou přivařeny dvě tyče, sloužící jako vzpěry proti síle motoru a tíze panelu. Na vrcholu osy je upevněn rám pro připevnění solárního panelu, který je schopný

nastavení sklonu úhlu od 17° do 70°. Nastavení sklonu úhlu je možné pouze ručně a to pomocí křídlové matice a posuvníku. Na spodní části osy je umístěno ozubené kolo, které přes řetěz přenáší otáčivý pohyb z motoru. K desce je též přišroubován krokový motor, na jehož ose je umístěno druhé ozubené kolo, které přenáší pohyb z motoru přes řetěz na kolo osy. Baterie, umístěna v zadní části desky, je přes regulátor nabíjena ze solárního panelu, který je umístěn na rámu.

12.4 Řídící algoritmus modelu řízení dle času

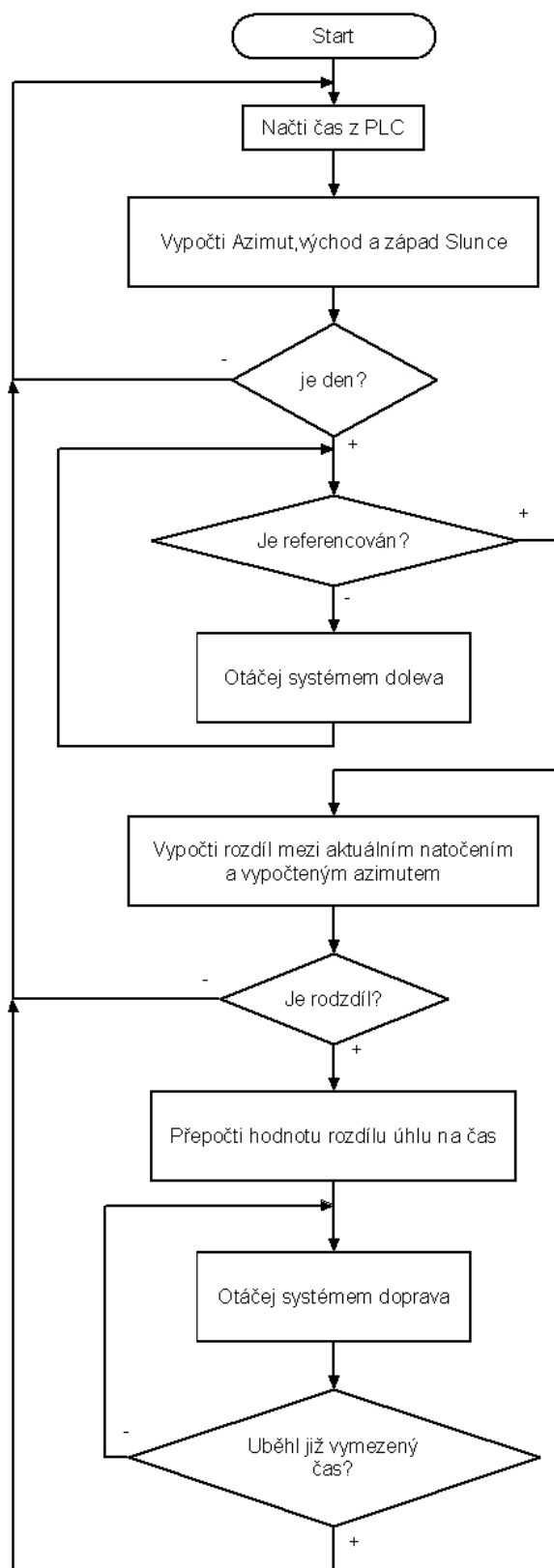
Laboratorní model má být schopen, po nezbytných konstrukčních úpravách, natáčet celé fotovoltaické systémy či pole v reálném provozu. Pro zpracování řídicího algoritmu zajišťujícího splnění této podmínky bylo vybráno PLC

Řídící algoritmus je rozdělen do tří základních částí. V první části se počítají hodnoty azimutu Slunce, výšky Slunce nad obzorem, východu a západu Slunce. Tyto hodnoty jsou při každém cyklu znovu vypočteny a jejich hodnoty jsou jako vstupní parametry předány druhé části.

V druhé části jsou tyto hodnoty zpracovány a je rozhodnuto, zda-li je v konkrétním datu aktuální čas v rozmezí východu a západu Slunce. Pokud ne, program vyčkává, dokud tato podmínka není splněna a ostatní algoritmy se zatím nespouštějí. Je-li tato podmínka splněna, program zjistí, zda-li byl systém po prvním spuštění referencován. Pokud nebyl, začne motor otáčet systémem, dokud není tohoto referenčního bodu dosaženo. Referenční bod je v modelu tvořen spínačem. Tento referenční bod je na modelu umístěn směrem na východ, a tudíž jsou všechny ostatní vypočtené hodnoty brány vzhledem k východu. V okamžiku, kdy systém dosáhne referenčního bodu, program tuto hodnotu uloží. Vypočtený azimut Slunce se přepočte na úhel, o který je nutno systémem pootočit, aby směřoval přímo ke Slunci. Tato hodnota slouží jako řídicí signál pro třetí část řídicího algoritmu. Ten, pokud obdrží tuto hodnotu a obdrží povolení k natočení systému, zajistí správné natočení tím, že vyšle motoru povel k otáčení. Vzhledem k použitému modulárnímu systému Siemens k ovládání krokového motoru není zasílána již zmíněná vypočtená hodnota úhlu, ale tato hodnota je přepočtena dle rychlosti otáčení na čas a pro tento vypočtený čas se systém otáčí. Druhá část algoritmu po celou dobu, kdy je dle systému den, kontroluje, zda je aktuálně nastavený azimut Slunce shodný s vypočteným. Pokud tomu tak není, vyšle signál třetí části společně s úhlem, o který je nutno systém pootočit a celý systém je pootočen. Výpočet je prováděn podle již zmíněných algoritmů,

z toho je zřejmé, že po prvotním natočení systému do požadované polohy se provádí natočení vždy jednou za hodinu.

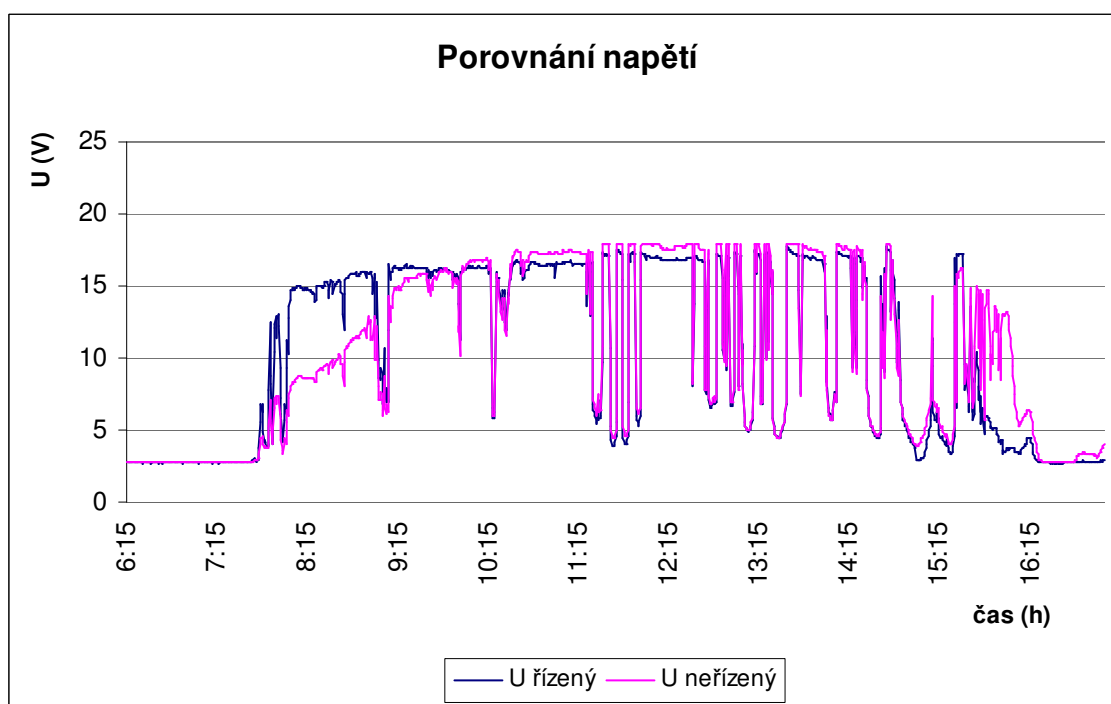
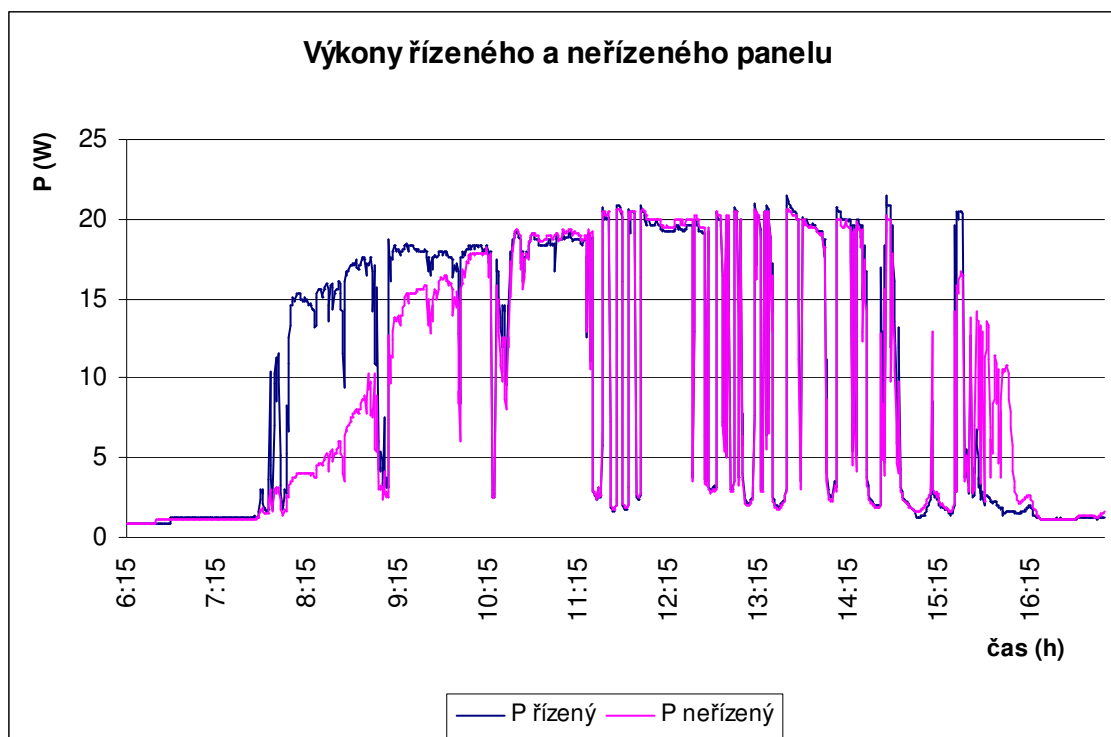
Pokud systém zjistí, že je již noc, zůstane systém natočen do poslední známé polohy, ale přednastaví se hodnota referencování na nereferencován. V okamžiku, kdy systém zjistí, že je opět den, provede se stejný postup nastavení jako při prvním spuštění.

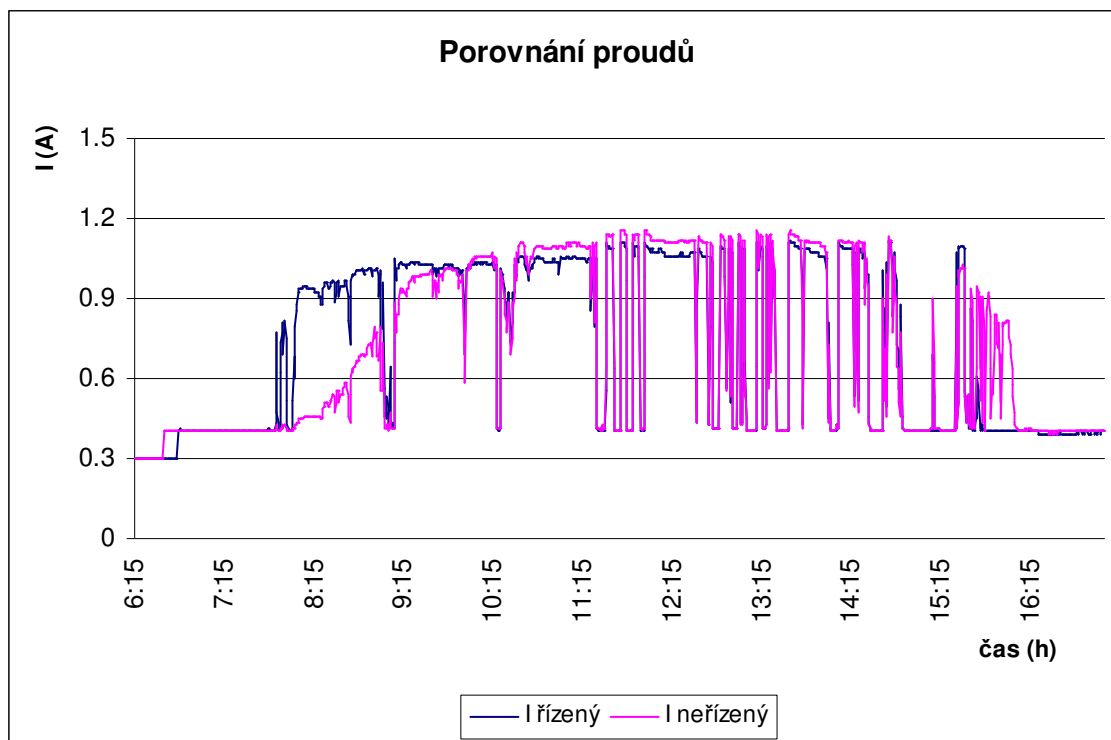


Obrázek 12.2 – Vývojový diagram řídicího algoritmu

12.5 Naměřená data z modelu řízení dle času

12.5.1 Data z letního provozu řízeného panelu dle času





Obrázek 12.3 – Porovnání řízeného a neřízeného panelu: výkon, napětí a proud (řazeno shora)

Před vyhodnocením získaných dat je nutné zdůraznit, že oba zakoupené fotovoltaické panely nejsou identické. Při měření bylo zjištěno, že panel použitý pro statický (neřízený) systém dodává o 5% vyšší hodnoty, nežli panel použitý pro řízený systém. Toto zmíněné zjištění je patrné na všech grafech vyšší hodnotou napětí, proudu i výkonu v časech mezi desátou a čtrnáctou hodinou. Po výpočet celkové energie v kapitole 16 již byly výkony korigovány o již zmíněnou hodnotu 5%.

Podmínky při měření:

Zátěž připojená k panelu: sériovo-paralelně řazené rezistory, tvořící zátěž $39\Omega/30W$

Počasí: Teplota : 23 - 30°C

Vlhkost : 70%

Oblačnost: dopoledne jasno s občasnou oblačností, odpoledne polojasno

Datum : 8.5.2006

Místo měření : Liberec, Technická univerzita, budova F, 3. patro, azimut okna ze kterého bylo prováděno měření je ve 12 hodin posunut o -14°

Sklon panelu : 30° od horizontální polohy

Veškeré údaje o počasí při měření byly získány z CAP-NET's Weather Station (stan.cap-net.cz), která je umístěna v centru Liberce.

Předešlé grafy jsou výsledkem celodenního měření napětí a proudu solárních panelů. Jeden panel byl statický a jeho aktivní snímací plocha byla po celý den nastavena k jihu a sklon panelu byl fixně nastaven na 50° . Druhý panel měl též nastavený neměnný sklon 50° , ale po celý den řízeně sledoval pohyb Slunce. Jeho počáteční nastavení bylo dle programu k východu a každou hodinu se panel pootočil do nově vypočtené polohy.

Jeden systém byl připojen k ovládací jednotce napevno zabudované do ovládací skříně v laboratoři, nebylo proto možné měřit modely na místě, které nebylo zastíněno. Všechna měření byla prováděna z okna laboratoře. Model byl připevněn na dřevěné desce, která byla před východem Slunce vysunuta z okna. Budova, ze které bylo měření prováděno (TUL, budova F, 3. patro) je natočena o 14° směrem na východ (zjištěno buzolou), takže modely měly větší osvětlení dopoledne a menší odpoledne. Poloha města Liberec v kotlině mezi Jizerskými horami, Ještědského hřebenu a Lužickými horami ovlivnila hodnotu skutečného východu a západu Slunce oproti hodnotám vypočítaným. Ze získaného pozorování je čas započítí a ukončení měření posunut přibližně o jednu hodinu, to jest čas potřebný, aby Slunce vyšlo nad okolní členitý terén. Při měření musel být brán zřetel i na stín, který bude vrhat budova, na místo ze kterého bylo měření prováděno. Při natočení panelu směrem k východu se ráno stín vržený budovou příliš neprojevil, přibližný čas dopoledního nežádoucího stínění je 30 minut, tj. čas potřebný k plnému osvětlení panelu (v grafech je znázorněn náhlým vzrůstem proudu – ten vzroste při plném osvětlení). Odpolední stín, vržený budovou, začíná dopadat na panely po čtvrté hodině a v půl páté jsou již panely zcela zastíněny.

Z těchto získaných poznatků je zřejmé, že za těchto podmínek není nutné provádět měření od východu do západu Slunce, ale začít měření při východu Slunce nad okolní terén a ukončit měření kolem sedmnácté hodiny, kdy již nelze sledovat pohyb Slunce a výsledky měření pro porovnání jsou již zkreslené. Proto byl zvolen měřicí interval od 6:00 do 17:00, tj. celkově 11 hodin (pro měření v měsíci květnu). Tento interval je použit i při ostatních typech měření.

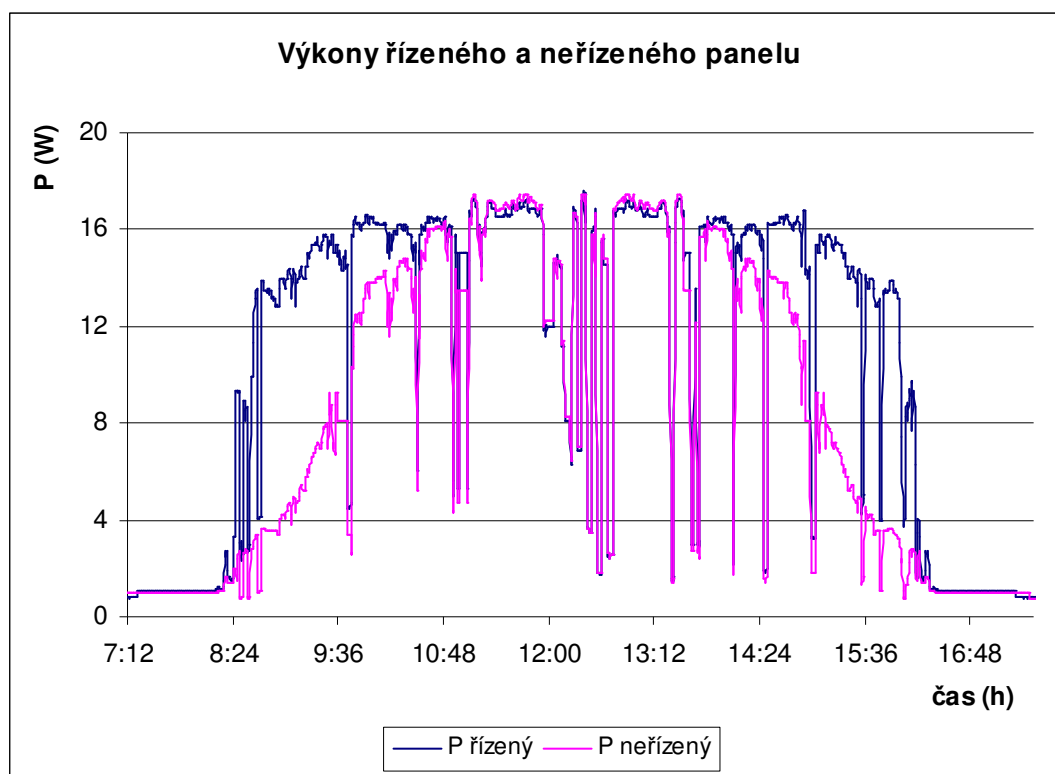
Jak je z předešlých grafů vidět, řízený článek je schopný dodávat v dopoledních hodinách více energie, než statický článek. Pokud by byly modely umístěny na místě, kde na ně nebude dopadat stín, v pozdním odpoledni by byl zisk na řízeném panelu opět větší, než na neřízeném. Protože v časovém období od 10 do 16 hodin (platí pro květen) jsou

výkony, které panely dodávají přibližně stejné, řízení v této době je téměř zbytečné, neboť výkonový zisk v porovnání řízeného neřízeného panelu je téměř stejný.

Rozvaha o využití řízení a porovnání různých druhů je provedena v kapitole 14.

Pro tento způsob řízení byla provedena několikera měření v letních měsících a několikera v zimních měsících. Výše je uvedeno letní měření, které je nejnázornější. Vybraný vzorek z měření je mírně ovlivněn dopolední místní oblačností (pokles napětí a proudu), během odpoledne oblačnosti přibývalo, průběh výkonů je tedy „skokovitý“. Po šestnácté hodině se zatáhlo úplně a měření bylo proto ukončeno. Přesto je dobře vidět, že v dopoledních hodinách je výkon dodávaný řízeným panelem o mnoho vyšší, než výkon dodávaný panelem neřízeným. Zimní měření je uvedeno následně.

12.5.2 Data ze zimního provozu řízeného panelu dle času



Obrázek 12.4 - Porovnání výkonu řízeného a neřízeného panelu, zimní provoz

Podmínky při měření:

Zátěž připojená k panelu: sériovo-paralelně řazené rezistory, tvořící zátěž $39\Omega/30W$

Počasí: Teplota : 1 - 5°C

Vlhkost : 83%

Oblačnost: dopoledne jasno, odpoledne polojasno

Datum : 2.12.2006

Místo měření : Liberec, Technická univerzita, budova F, 3. patro, azimut okna ze kterého bylo prováděno měření je ve 12 hodin posunut o -14°

Sklon panelu : 60° od horizontální polohy

Při získávání dat v zimním období byl především kladen důraz na získání dat, které budou sloužit pro porovnání výkonů v letním a zimním provozu, aby bylo možno určit, o kolik procent se liší výkon dodaný panely v závislosti na ročním období. Proto je zde uveden pouze graf výkonů. Grafy proudů a napětí, z nichž byl výsledný výkon vypočten, není již potřeba uvádět, neboť pro samotné porovnání již nejsou důležité a v předchozí kapitole o letním provozu jsou zobrazeny.

V kapitole 14 je proveden rozbor rozdílů výkonů v porovnání s ostatními druhy řízení. Proto zde není zmíněn.

13 Laboratorní model řízeného natáčení fotovoltaických článků dle Slunce

Laboratorní model řízeného natáčení fotovoltaických článků, který je v této kapitole popisován vznikl za podpory grantu FRVŠ 2308/2005, za jehož finančního přispění mohla být realizována navržená konstrukce. Tento model je praktická ukázka možnosti natáčení dle aktuální polohy Slunce dvěma pomocnými solárními mini panely kolem jedné osy (vertikální) s možností horizontálního ručního nastavení.

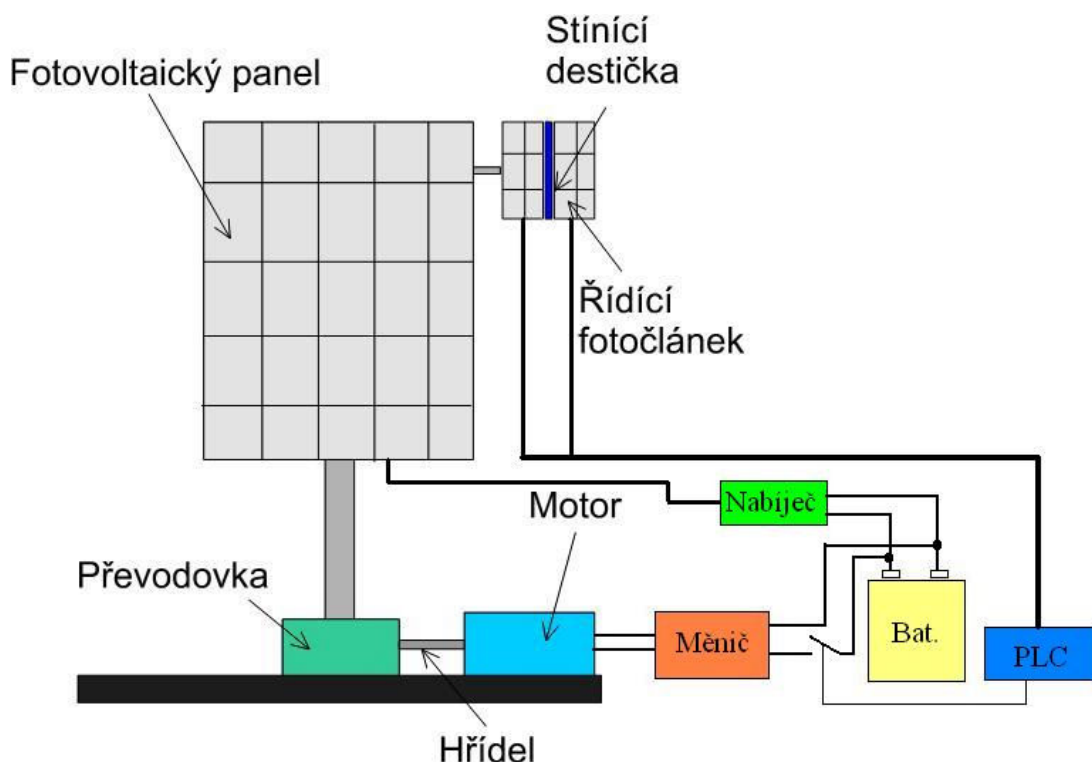
13.1 Hlavní použité součásti

- PLC AMiNi-E od firmy Amit
- Stejnoseměrný motor s převodem 1:540 (24V DC)
- Napěťový měnič 12V DC/24V DC (12A)
- 2 x mini solární panel od firmy Solartec (0.5V, 350mA)
- 2 x relé (24V, 6A)
- Solární panel SolarMaster 26W od firmy Solartec
- Regulátor nabíjení a vybíjení baterie
- Baterie Varta 12V / 50Ah
- Otočný rám s úchyty pro solární panel
- Dřevěná základní deska pro připevnění motoru, otočného rámu a baterie

13.2 Princip modelu řízení dle skutečné polohy Slunce

Princip tohoto modelu se dosti liší oproti předešlému modelu. Vychází z principu nestejnoměrného ozáření dvou aktivních polovodičových ploch. Dva stejné polovodičové solární články jsou umístěny vedle sebe a mezi nimi je umístěna stínící destička. Tato destička má dvě části a každá z nich je skloněna směrem k mini panelu. Celý tento systém, solární články a stínící destička, je řídicí částí celého modelu. K nestejnoměrnému ozáření obou destiček dochází v případě, že systém není směřován přímo ke Slunci. Na mini panely je vržen stín od destičky a na jejich výstupu vznikne různý proud. Tento výstupní proud je přiváděn jako řídicí signál do PLC, kde je dále zpracován. Hodnoty vstupů jsou odečteny a z tohoto rozdílu již lze přímo usoudit, na kterou stranu se Slunce oproti modelu posunulo. Dle získaného rozdílu proudů je nastaven směr otáčení a při

určité velikosti rozdílu je poslán povel motoru, který celým systémem pootočí do polohy, která odpovídá poloze Slunce.



Obrázek 13.1 - Konstrukční schéma řízeného modelu

13.3 Konstrukční popis modelu řízení dle skutečné polohy Slunce

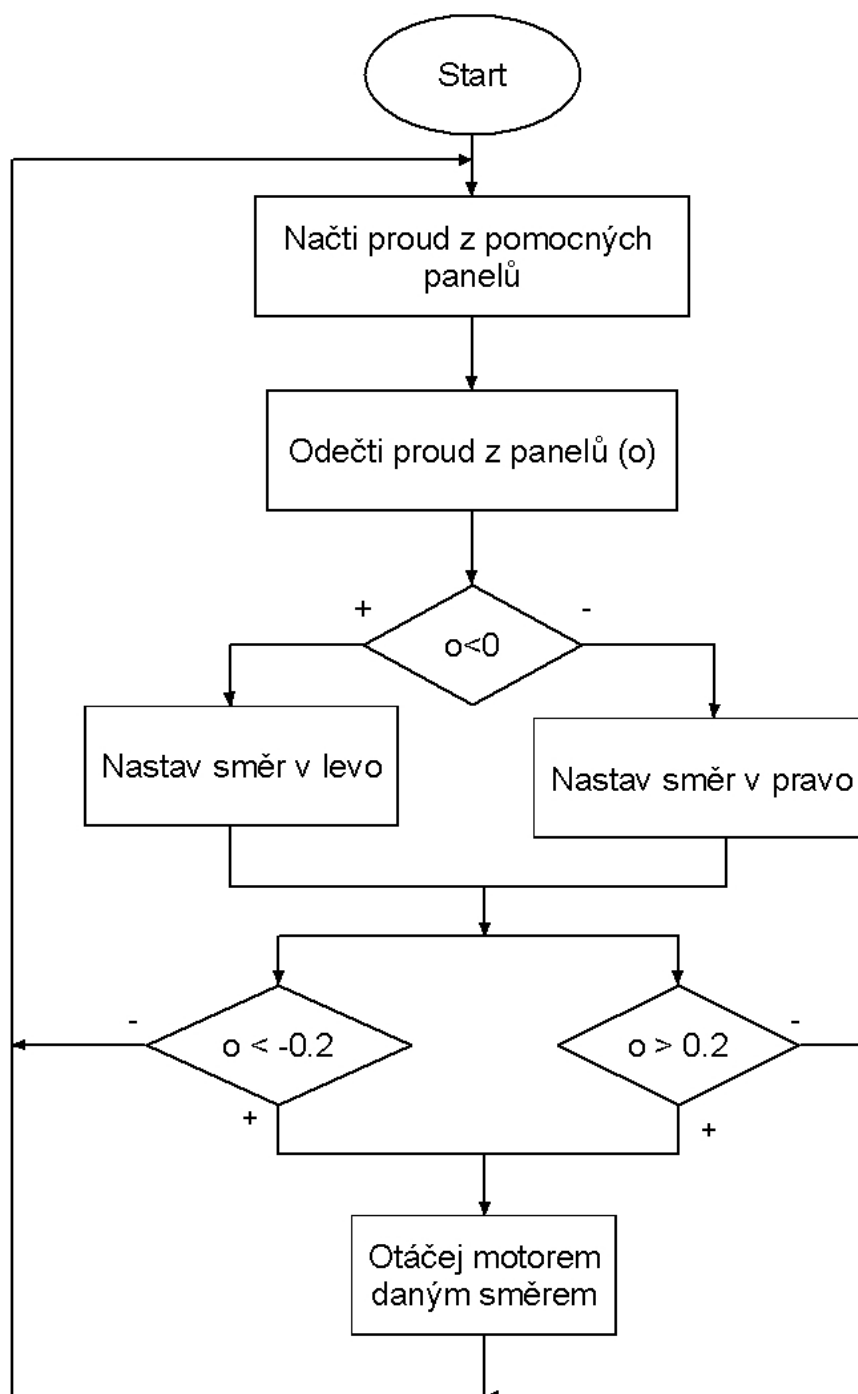
Model je shodný s modelem popisovaným v kapitole 13.2. Tedy základní dřevěná deska s připevněnou otočnou tyčí opatřenou rámem pro solární panel. Navíc je k tomuto modelu připevněn malý rám na vrchní straně hlavního rámu, ve kterém jsou umístěny dva mini panely a stínicí destička. Převod ze stejnosměrného motoru na otočnou tyč je realizován opět řetězem s ozubenými koly přes převodovku integrovanou k motoru. Převod je šnekový 1:540 a tudíž splňuje základní předpoklad samosvornosti. Model může být tedy vystaven větru a poloha panelu bude stále taková, jakou nastavil motor. Výstupy z mini panelů jsou zavedeny do měřících vstupů PLC a z digitálních výstupů jsou vyvedeny dva vodiče. Prvním je ovládáno relé na směr motoru, pomocí kterého jsou přepínány póly napěťového zdroje k motoru. Druhý výstup je také k relé, které ovládá zapínání a vypínání napětí do motoru. Napětí do motoru je dodáváno baterií (12V), které je přes napěťový měnič (12V/24V) převedeno na 24V, což je napětí nezbytné pro napájení

motoru. V obvodu je zakomponován hlavní vypínač a také 25A pojistka, jejíž přítomnost je nutná vzhledem k napětovému měniči v rámci bezpečnosti.

13.4 Řídící algoritmus modelu řízení dle skutečné polohy Slunce

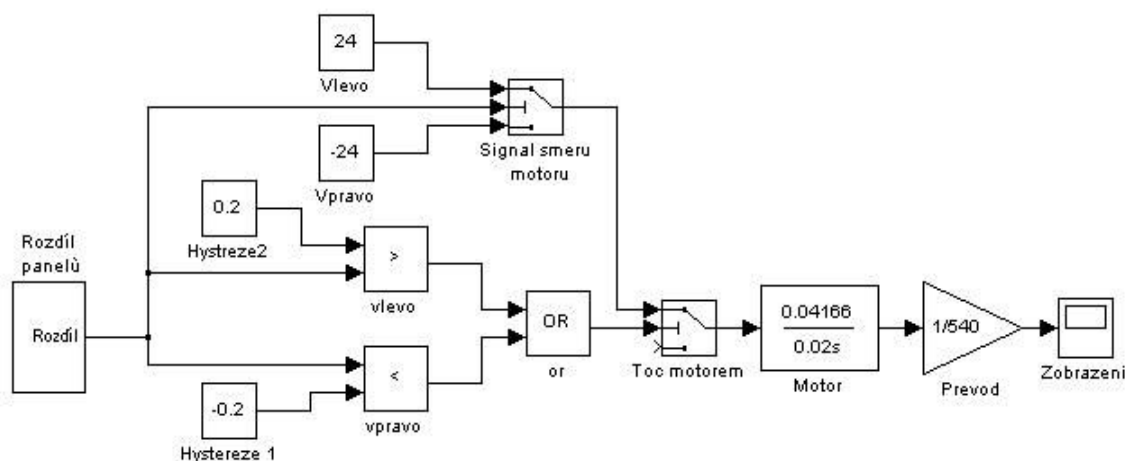
Princip tohoto řízení je velice jednoduchý. Z řídících panelů jsou přivedeny výstupy do PLC na proudové vstupy, které jsou cyklicky načítány v intervalu 0,1s. Programově je proveden jejich rozdíl a dle tohoto rozdílu je rozhodnuto, jaký směrem se bude panel případně otáčet a jestli se má otáčet. Na obrázku (Obrázek 13.2) je znázorněn algoritmus, který zpracovává proudové vstupy z panelů. Pokud na řídících panelech vznikne rozdílný proud, který je větší než nastavené pásmo necitlivosti (0,2), motor se začne otáčet směrem daným znaménkem rozdílu proudů z řídících panelů. Pokud přestane svítit Slunce, na panelech je minimální proud a jejich rozdíl nikdy nedosáhne požadované hodnoty pro roztočení panelu. Proto celý systém stojí, dokud Slunce opět nevysvitne.

Pokud Slunce vysvitne až v odpoledních hodinách, celý systém se za Sluncem natočí díky stínící destičce. Tato destička je složena ze dvou stejně velkých hliníkových plechů a každá část je vyhnuta od vertikální osy o 10 stupňů. Díky tomu řídící systém reaguje i na Slunce, které vyjde až v odpoledních hodinách.

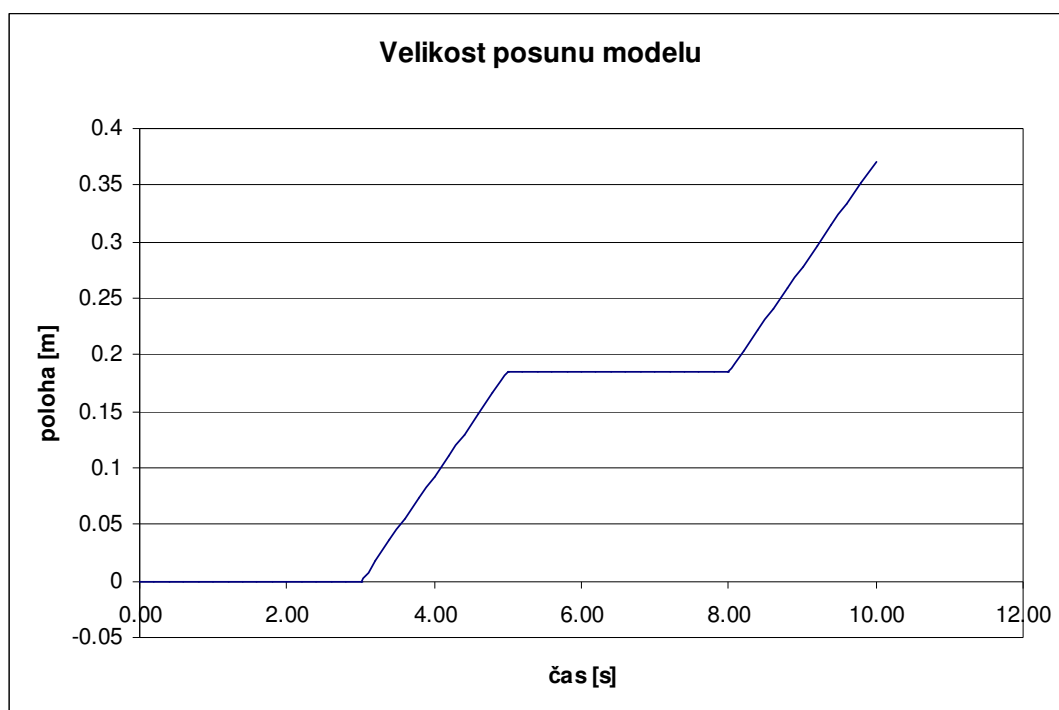


Obrázek 13.2 – Vývojový diagram algoritmu řízení

13.5 Zjednodušené blokové schéma řízení modelu dle polohy Slunce



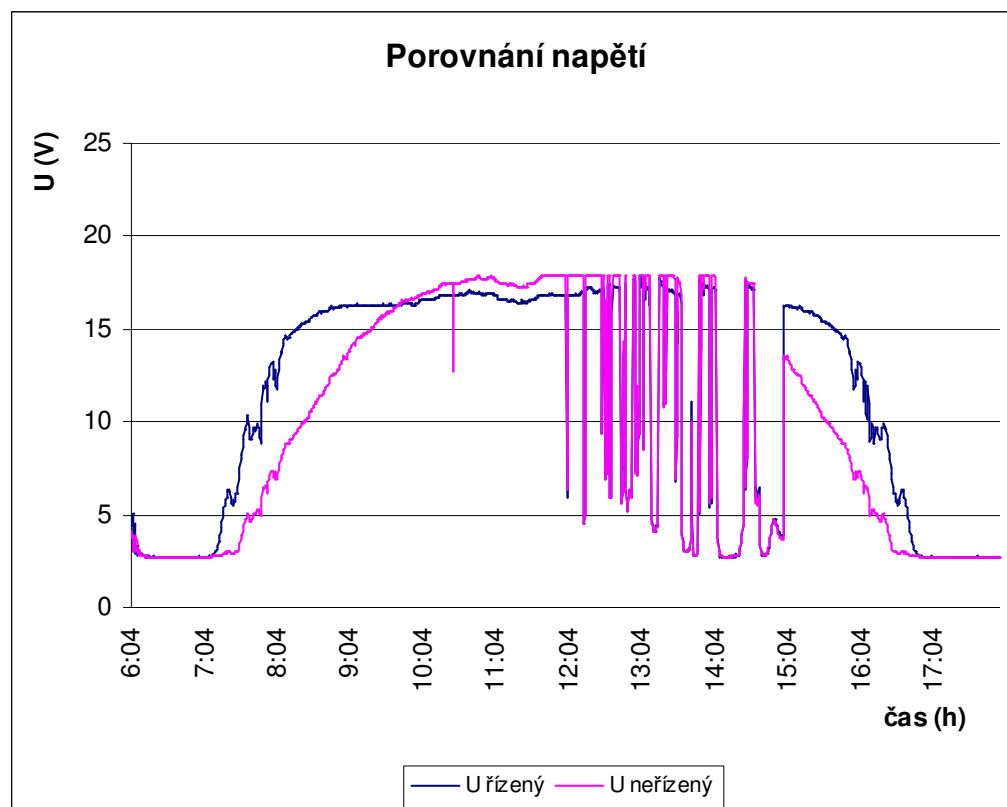
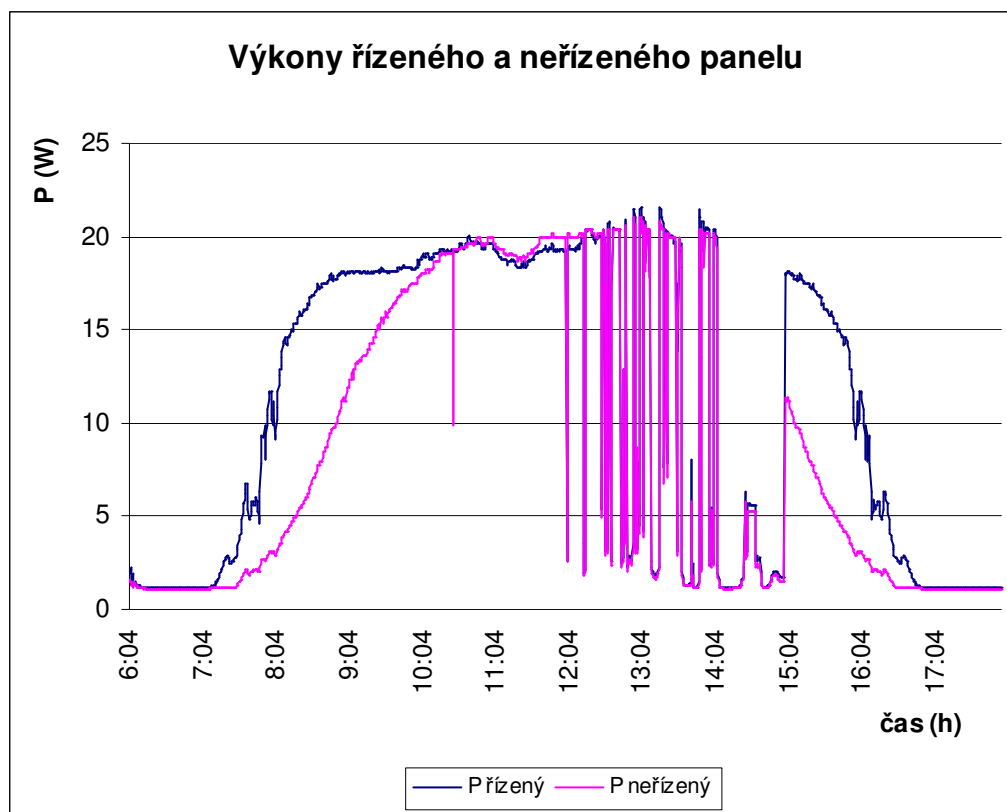
Obrázek 13.3 – Zjednodušené blokové schéma řízení

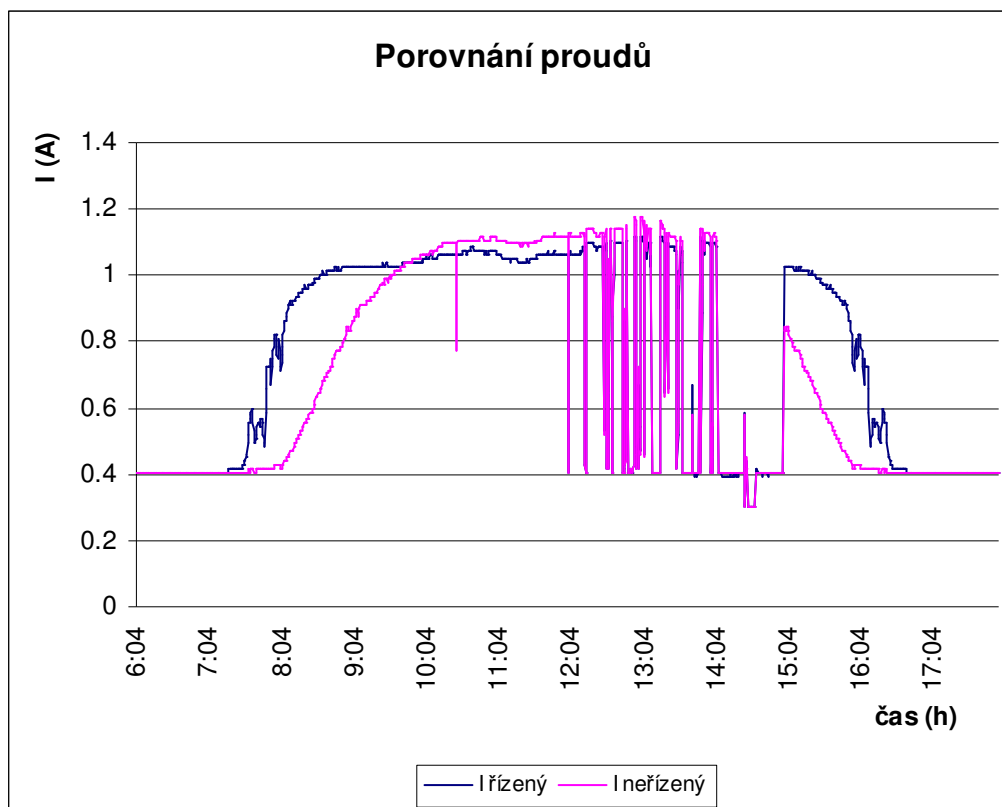


Obrázek 13.4 – Dráha pootočení panelu při rozdílech panelů (nasimulované vstupy pro dvě změny)

13.6 Naměřená data z modelu řízení dle skutečné polohy Slunce

13.6.1 Data z letního provozu řízeného panelu dle skutečné polohy Slunce





Obrázek 13.5 – Porovnání řízeného a neřízeného panelu: výkon, napětí a proud (řazeno shora), letní provoz

Před vyhodnocením získaných dat je nutné zdůraznit, že oba zakoupené fotovoltaické panely nejsou identické. Při měření bylo zjištěno, že panel použitý pro statický (neřízený) systém dodává o 5% vyšší hodnoty, nežli panel použitý pro řízený systém. Toto zmíněné zjištění je patrné na všech grafech vyšší hodnotou napětí, proudu i výkonu v časech mezi desátou a čtrnáctou hodinou. Pro výpočet celkové energie v kapitole 16 již byly výkony korigovány o již zmíněnou hodnotu 5%.

Podmínky při měření:

Zátěž připojená k panelu: sériovo-paralelně řazené rezistory, tvořící zátěž 39Ω/30W

Počasí: Teplota : 20 - 26°C

Vlhkost : 70%

Oblačnost: dopoledne jasno, odpoledne polojasno

Datum : 7.5.2006

Místo měření : Liberec, Technická univerzita, budova F, 3. patro, azimut okna ze kterého bylo prováděno měření je ve 12 hodin posunut o -14°

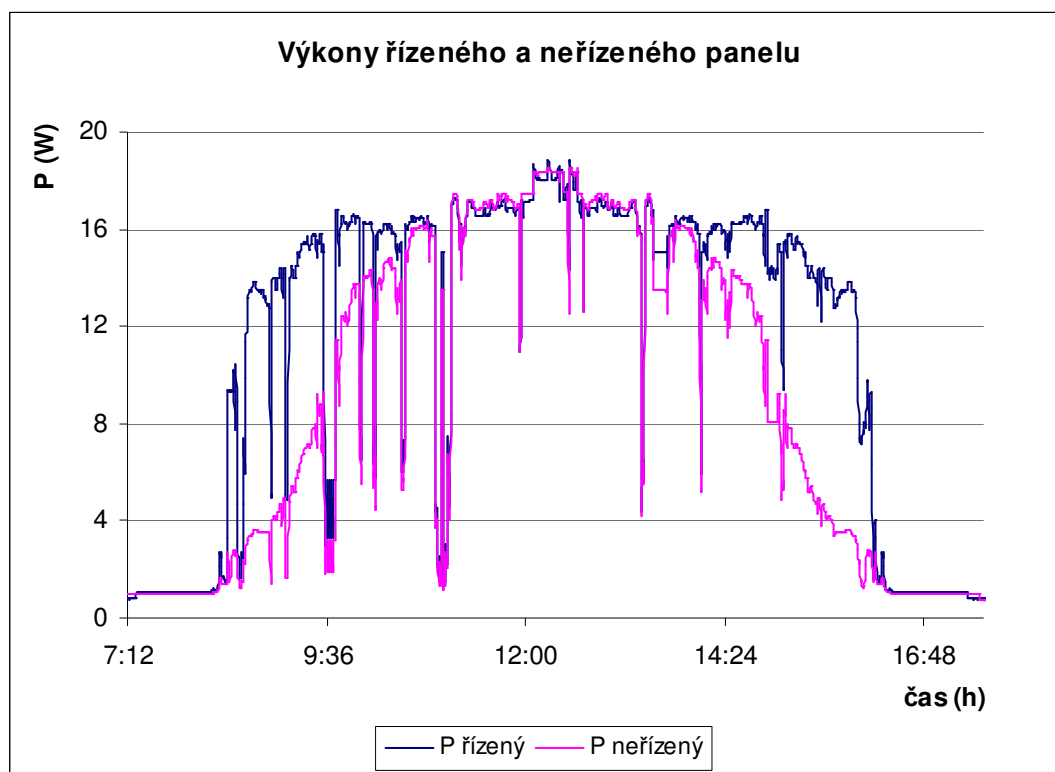
Sklon panelu : 30° od horizontální polohy

Veškeré údaje o počasí při měření byly získány z CAP-NET's Weather Station (stan.cap-net.cz), která je umístěna v centru Liberce.

Podmínky pro měření na tomto modelu jsou shodné, jako podmínky uvedené v kapitole 12.5. Proto zde nebudou dopodrobna popisovány. U tohoto způsobu řízení není nutné končit měření při dopadnutí stínu na panel, neboť řízení dle aktuální polohy Slunce se neotáčí směrem do budovy, jako předešlý model, který měl natáčení předem přesně dáno. Tento model automaticky hledá největší intenzitu osvětlení, a proto při měření zůstává natočený směrem, ze kterého získává největší výkon. Proto bylo měření prodlouženo do osmnácti hodin. Slunce je sice již za budovou, ale určitý výkon lze ještě získávat.

V kapitole 14 je proveden rozbor rozdílů výkonů v porovnání s ostatními druhy řízení. Proto zde není zmíněn. Pro tento způsob řízení byla provedena několikera měření v letních měsících a několikera v zimních měsících. Je zde uvedeno jedno z každého typu měření, které je nejnázornější. Z nich je dobře vidět, že v ranních a odpoledních hodinách je výkon dodávaný řízeným panelem o mnoho vyšší, než výkon dodávaný neřízeným panelem. V následující kapitole je znázorněn zmíněný zimní provoz.

13.6.2 Data ze zimního provozu řízeného panelu dle skutečné polohy Slunce



Obrázek 13.6 - Porovnání výkonu řízeného a neřízeného panelu, zimní provoz

Podmínky při měření:

Zátěž připojená k panelu: sériovo-paralelně řazené rezistory, tvořící zátěž $39\Omega/30W$

Počasí: Teplota : 3 - 7°C

Vlhkost : 85%

Oblačnost: dopoledne jasno, odpoledne polojasno

Datum : 1.12.2006

Místo měření : Liberec, Technická univerzita, budova F, 3. patro, azimut okna ze kterého
bylo prováděno měření je ve 12 hodin posunut o -14°

Sklon panelu : 60° od horizontální polohy

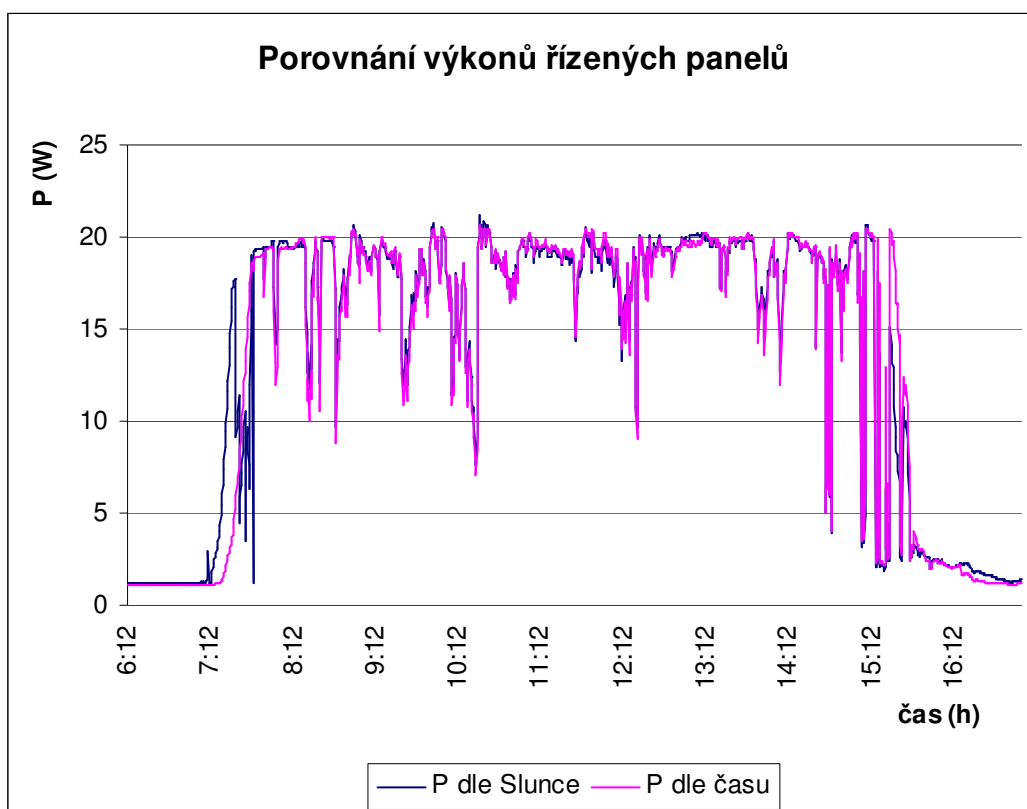
Při získávání dat v zimním období byl především kladen důraz na získání dat, které budou sloužit pro porovnání výkonů v letním a zimním provozu, aby bylo možno určit, o kolik procent se liší výkon dodaný panely v závislosti na ročním období. Proto je zde uveden pouze graf výkonů. Grafy proudů a napětí, z nichž byl výsledný výkon vypočten, není již potřeba uvádět, neboť pro samotné porovnání již nejsou důležité a v předchozí kapitole o letním provozu jsou zobrazené.

V kapitole 14 je proveden rozbor rozdílů výkonů v porovnání s ostatními druhy řízení. Proto zde není zmíněn.

14 Porovnání řízených i neřízených modelů

14.1 Porovnání dvou řízených modelů

Z předcházejících kapitol je vidět, že panely, které byly řízeny, získají ze slunečního záření více energie, než modely, které se nepohybují. Je vhodné se také zabývat tím, který z řízených modelů dokáže sledovat Slunce tak, aby získal více energie. Pro toto zjištění bylo provedeno měření, kdy oba dva modely byly řízené (řízení dle času a dle skutečné polohy Slunce) a byly zaznamenávány jejich výkonové hodnoty. Na obrázku (Obrázek 14.1) jsou tyto hodnoty výkonů znázorněny.

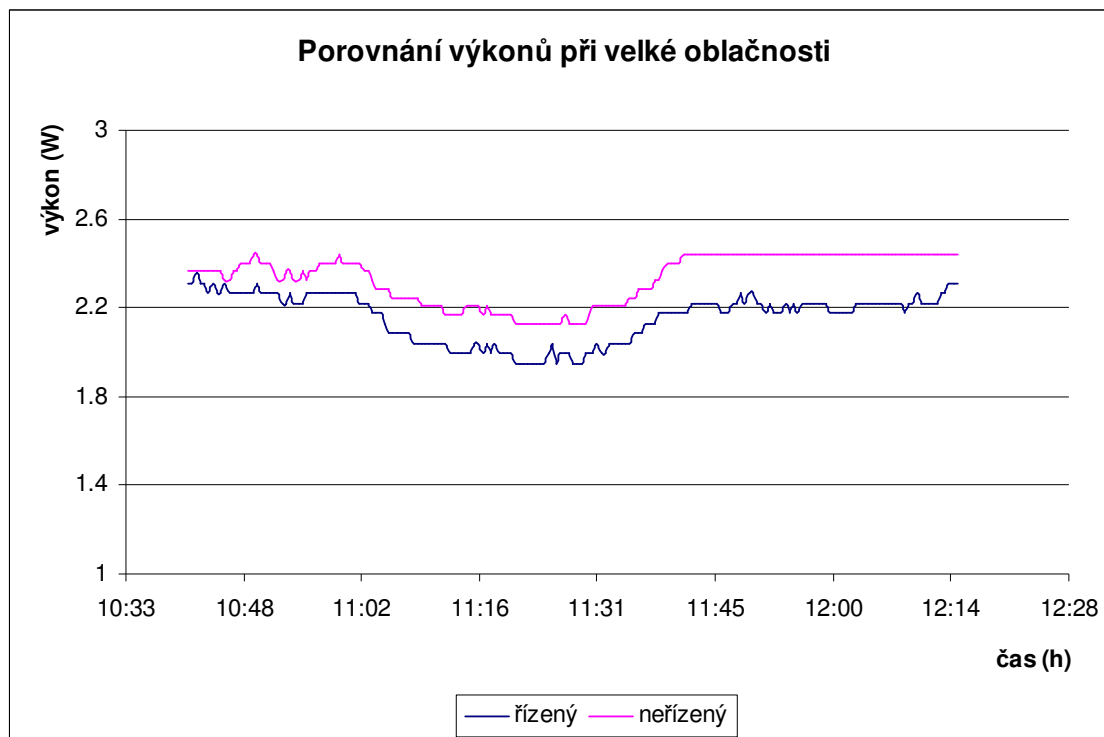


Obrázek 14.1 – Porovnání výkonů řízených panelů dle času a dle polohy Slunce, ukončené měření v 17 hodin

Z tohoto grafu je zřejmé, že brzy ráno jsou hodnoty mírně odlišné, ale kolem osmé hodiny dopolední se již dodávaný výkon ustálil na určité hodnotě a panely začaly dodávat stejné množství energie. Z tohoto měření lze tedy usoudit, že pokud je použito řízené natáčení fotovoltaických panelů, je možné si vybrat jeden z těchto modelů, protože dodávaný výkon je téměř stejný. Toto měření bylo prováděno při poměrně jasném počasí, s občasnou místní oblačností (v grafu je to znázorněno poklesem výkonu). Pokud by však po celý den Slunce zakrývala oblačnost a okolo by byla modrá obloha, model, který je

řízen podle času by neustále neúnavně sledoval přesnou polohu Slunce, zatímco druhý model dle Slunce se natočí směrem k modré obloze, protože hodnota dopadajícího záření je pro něj v takovém případě lepší (panel dodává vyšší výkon). Toto tvrzení bylo několikrát ověřeno (bez přímého záznamu dat) a dá se říci, že na těchto konkrétních panelech je rozdíl v hodnotách výkonu až 10% ve prospěch modelu řízeného dle Slunce. Na základě těchto měření lze říci, že při použití řízeného natáčení je výhodnější řízení dle Slunce. Toto tvrzení je dále podpořeno faktem, že pokud je zataženo nebo prší, a tedy Slunce nesvítí, hodnoty, které dodávají panely (řízený i neřízený), jsou úplně stejné, jak je vidět na obrázku (Obrázek 14.2). Nezáleží tedy na tom, zda se systém natáčí nebo ne. Pokud takový případ nastane, model, který je řízen dle času se po celý den pohybuje (bez ohledu na svit Slunce) a tedy spotřebovává energii, kterou v některých případech nedokáže ani vyrobit. Na druhou stranu model řízený dle Slunce se při takovém počasí vůbec netočí a zůstává natočen takovým směrem, jakým byl natočen při posledním výskytu Slunce. Nespotřebovává žádnou energii (tedy pokud zanedbáme napájení řídicí jednotky, která má minimální spotřebu).

Naměřená data jsou ze dne 14. 5. 2006, měření bylo provedeno v Liberci, z okna budovy F, TUL.



Obrázek 14.2 – Porovnání výkonů řízeného a neřízeného panelu při velké oblačnosti pro vymezený časový úsek, dne 10. 6. 2006,

Porovnání výkonů řízeného a neřízeného panelu při velké oblačnosti je opět zatíženo rozdílnými fotovoltaickými panely, tj. rozdílem výstupních hodnot v řádu 5%.

14.2 Porovnání panelů v letním provozu

14.2.1 Porovnání panelů řízených dle času a neřízených

Při měření výkonu řízeného panelu dle času byl společně zjišťován výkon panelu, který byl statický a nastaven k jihu. Oba panely měly nastaven úhel sklonu 30° od horizontální osy. Toto měření pak vzniklo jako základ pro porovnání řízeného a neřízeného panelu. V grafech v kapitole 12 je vidět, jak se tyto rozdílné způsoby řízení, respektive neřízení, projeví na výkonu dodávaném panelem. Data, která byla použita v grafech, byla získána z měření v 30 sekundových intervalech, lze tedy určit celkovou energii, která byla panelem získána. Tuto hodnotu již lze použít pro porovnání energií a pomocí ní se dá vypočítat, jaká je návratnost řízení, či zda se vůbec vyplatí řídit (jestli energie spotřebovaná na řízení není větší, než energie navíc dodaná řízeným panelem).

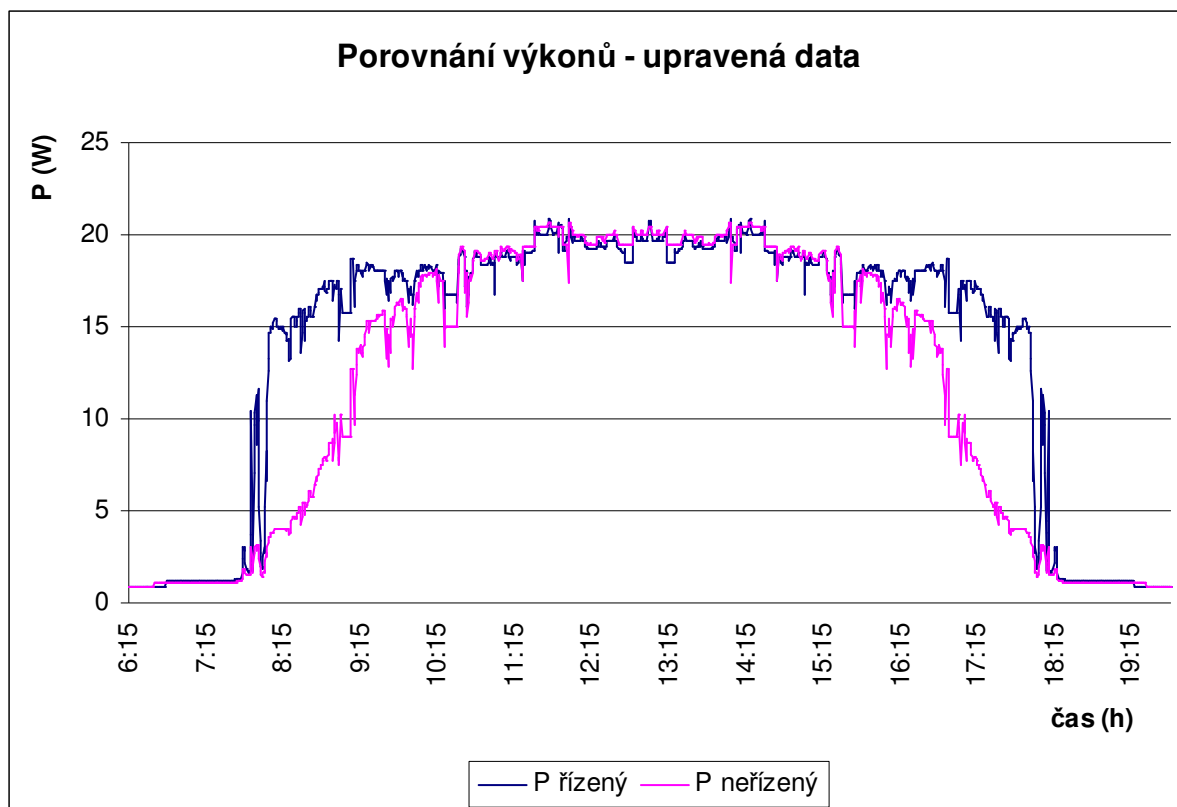
Z dat byly zjištěny následující hodnoty:

	Řízený model	Neřízený model	jednotky
Celková energie	109,2	98,5	Wh
Procentní rozdíl	100	89,6	%

Tabulka 14.1 – Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro reálné měření

Z tabulky Tabulka 14.1 je vidět, že řízený panel získá přibližně o 11% více energie, než panel neřízený.

Tyto hodnoty byly zjištěny z reálného měření, kdy po celý den nebylo ideální počasí. Na obloze bylo oblačno, a tedy hodnoty získané nebyly perfektní. Je možné však tyto hodnoty zidealizovat, aproximací hodnot při zatažení předpokládanými hodnotami, které by byly v dané době byly na panelu naměřeny, při jasném počasí. Následující graf ukazuje zidealizované hodnoty měření.



Obrázek 14.3 – Zidealizovaný průběh výkonů pro řízený panel dle času a neřízeného panelu

Jak již bylo řečeno, dopolední měření dává nějaké hodnoty dříve než odpolední a měření je při letním čase symetrické kolem třinácté hodiny. Lze tedy použít dopolední data (6 – 13 hodin), a data otočit a přidat je k dopoledním datům stejně, jako jsou odpolední. Při takovém předpokladu a vyrušení dat při zastínění Slunce oblačností lze získat ideální graf výkonu pro daný den a dané místo měření.

Po tomto zidealizování je možné provést rozbor celkových energií, a jejich procentuelních rozdílů a dostaneme následující hodnoty:

	Řízený model	Neřízený model	jednotky
Celková energie	185,5	158,3	Wh
Procentní rozdíl	100	85,3	%

Tabulka 14.2 – Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro zidealizované měření

Z tabulky (Tabulka 14.2) je vidět, že řízený panel získá přibližně o 15% více energie, než panel neřízený, pokud jsou data přizpůsobena ideálním podmínkám – tedy jasné obloze po celý den. Z toho plyne, že za ideálních podmínek dodává řízený systém o 15% více energie než system neřízený.

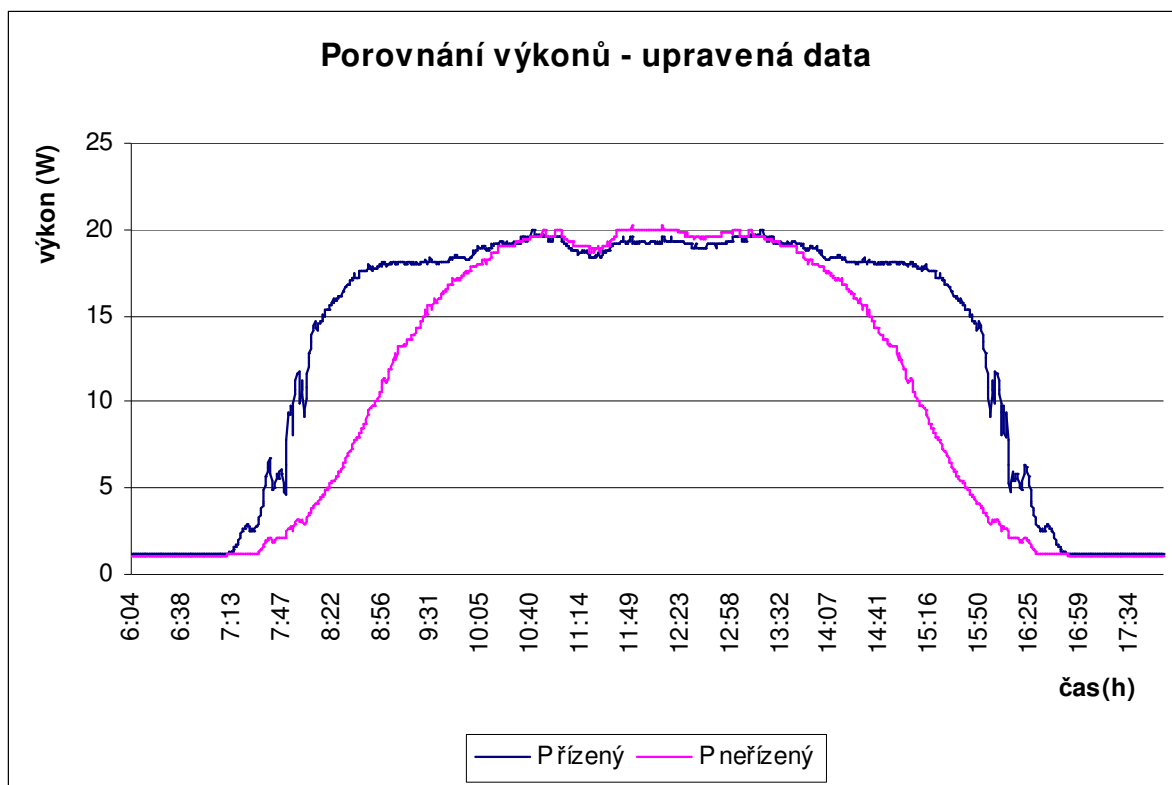
14.2.2 Porovnání panelů řízených dle skutečné polohy Slunce a bez řízení

Stejně jako v kapitole 14.2 i při tomto měření byla zároveň získávána data neřízeného panelu a to ve 30 sekundových intervalech, jako u všech ostatních měření. Ta jsou zároveň s daty řízeného modelu zobrazena v grafech v kapitole 13. Z těchto grafů lze určit, jaká energie byla za den získána. V následující tabulce je celková energie obou panelů a také jejich procentní rozdíl energie.

	Řízený model	Neřízený model	jednotky
Celková energie	129,7	102,9	Wh
Procentní rozdíl	100	79	%

Tabulka 14.3 - Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro reálné měření

Z tabulky (Tabulka 14.3) lze jednoznačně určit, že zisk energie řízeného panelu oproti neřízenému je 21%. Měřená data jsou však silně ovlivněna zatažením oblohy, jak je vidět v grafech výkonu v kapitole 14.2.2. Proto je nutné provést úpravu do ideálního stavu způsobem, jako v předchozí kapitole. Na obrázku (Obrázek 14.4) jsou vidět data zidealizovaná, ze kterých můžeme usuzovat, jak bude celý systém výkonný při jasném počasí.



Obrázek 14.4 - Zidealizovaný průběh výkonů pro řízený panel dle polohy Slunce a neřízeného panelu

Jak je z grafu vidět, ráno a večer jsou zisky z řízeného panelu o mnoho vyšší, než u neřízeného. Po zidealizování je třeba provést stejný výpočet energií a procentuálního rozdílu, jako z reálných dat. Závěr je paradoxně horší – procentuelní zisk se snížil o 2%. Vyšší zisk byl u reálných dat dán velkým procentuálním zastíněním Slunce během dne. Pro zidealizovaná data je procentuální rozdíl energie v hodnotě 19%, což se dá považovat za velice příznivé číslo.

	Řízený model	Neřízený model	jednotky
Celková energie	155,8	126,9	Wh
Procentní rozdíl	100	81,8	%

Tabulka 14.4 - Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro zidealizované měření

14.3 Porovnání panelů v zimním provozu

V průběhu získávání dat pro zimní provoz bylo měření „sabotováno“ počasím, neboť v Liberci je v zimním období převážně zataženo. Získání zde předvedených dat bylo tedy nesmírně obtížné, neboť slunečný den je v těchto místech velmi vzácný.

V následujících podkapitolách budou vyhodnoceny jednotlivé druhy řízení. Kvůli již zmíněnému nevhodnému počasí v zimních měsících nebude pro zimní provoz vyhodnocováno zidealizované měření, neboť to dle mého názoru nemá, vzhledem k nepříznivému počasí, skutečnou vypovídací hodnotu.

14.3.1 Model řízení dle skutečné polohy Slunce

Předešlé vyhodnocení letního měření vyšlo jako velice pozitivní pro řízený panel. Je však důležité provést vyhodnocení řízení panelu i v zimních měsících, aby byl obrázek řízeného natáčení a jeho využitelnosti úplný a mohl o něčem vypovídat.

Při měření výkonu řízeného panelu dle času byl společně zjišťován výkon panelu, který byl statický a nastaven k jihu, stejně jako tomu bylo v letních měsících. Oba panely měly nastaven úhel sklonu 60° od horizontální osy. Data byla zaznamenávána opět ve 30 sekundových intervalech.

V následující tabulce jsou uspořádány naměřené energie z řízeného a neřízeného panelu.

	Řízený model	Neřízený model	jednotky
Celková energie	104,8	82,7	Wh
Procentní rozdíl	100	79	%

Tabulka 14.5 - Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro reálné měření

Z předchozí tabulky (Tabulka 14.5) lze určit, že energie získaná z řízeného panelu je přibližně o 21% vyšší, než energie získaná z neřízeného panelu. Tento zisk odpovídá zisku, který byl zjištěn při letním porovnávání panelů.

14.3.2 Model řízení dle času

V zimních měsících bylo změřeno i řízení dle času. Toto měření, je stejně jako předešlé, nutností pro správné porovnání řízeného natáčení panelů.

Při měření výkonu řízeného panelu dle času byl společně zjišťován výkon panelu, který byl statický a nastaven k jihu, stejně jako tomu bylo v letních měsících. Oba panely měly nastaven úhel sklonu 60° od horizontální osy. Data byla zaznamenávána opět ve 30 sekundových intervalech.

V následující tabulce jsou uspořádány naměřené energie z řízeného a neřízeného panelu.

	Řízený model	Neřízený model	jednotky
Celková energie	99,5	77,5	Wh
Procentní rozdíl	100	78	%

Tabulka 14.6 - Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro reálné měření

Z předchozí tabulky (Tabulka 14.6) lze určit, že energie získaná z řízeného panelu je přibližně o 22% vyšší, než energie získaná z neřízeného panelu.

14.4 Porovnání teoretických výkonů panelů se získanými hodnotami

Jak je ukázáno v předchozích podkapitolách 14.1, 14.2 a 14.2.2, rozdíl výkonů dodávaných řízeným a neřízeným fotovoltaickým panelem je znatelný. V následujících tabulkách bude vyobrazeno, kolik mohl fotovoltaický panel dodat energie ve dnech, ve kterých bylo provedeno měření popsané v kapitolách 12 a 13. Tabulka jsou sestavena pro řízený i neřízený panel v porovnání s výkonem, který lze dodat, kdyby mohl fotovoltaický panel dodávat po celý den nominální hodnotu 26W. Také s hodnotami, kdy je výkon panelu závislý na velikosti jeho osluněné plochy (tj. 36 fotočlánků) a na pohybu Slunce.

	E_{mer} [Wh]	E_{upr} [Wh]	E_{sim} [Wh]	E_{max} [Wh]
Řízený panel	129.7	155.8	256.9	370.5
Neřízený panel	102.9	126.9	211.7	370.5

Tabulka 14.7 – Tabulka porovnání energií řízeného a neřízeného panelu z modelu řízení dle Slunce s teoretickými energiemi

	E_{mer} [Wh]	E_{upr} [Wh]	E_{sim} [Wh]	E_{max} [Wh]
Řízený panel	109.2	185.5	273.8	373.1
Neřízený panel	98.5	158.3	212.8	373.1

Tabulka 14.8 - Tabulka porovnání energií řízeného a neřízeného panelu z modelu řízení dle času s teoretickými energiemi

E_{mer} - naměřená energie za celý den

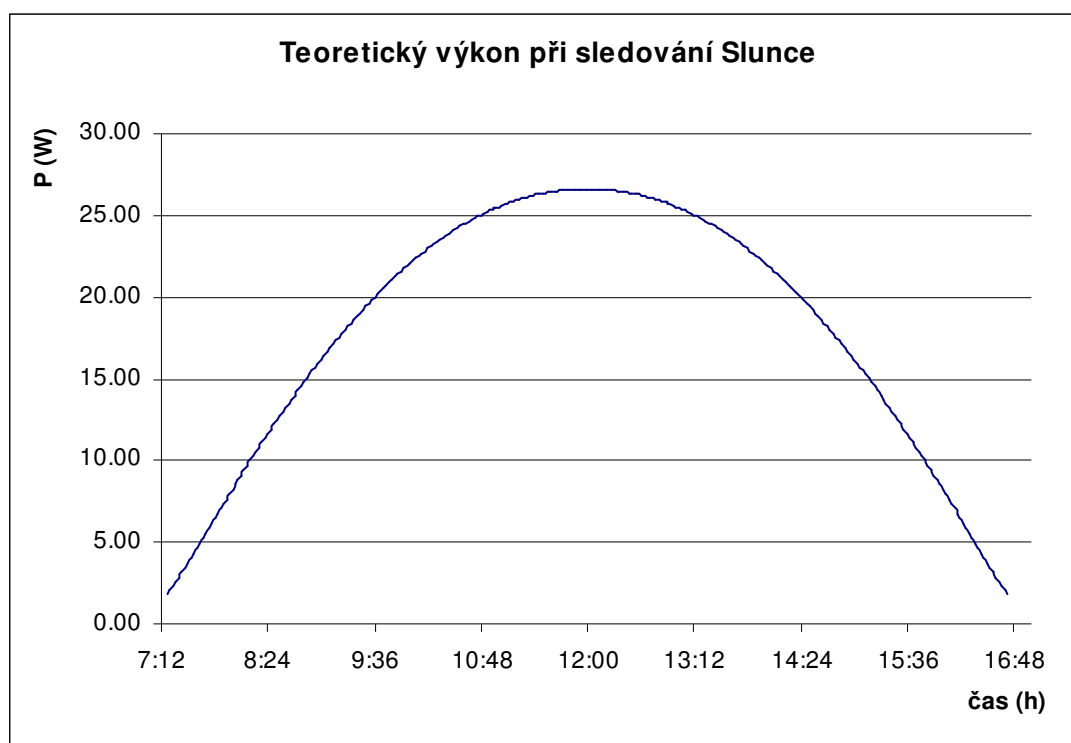
E_{upr} - naměřená energie za celý den upravená

E_{sim} - nasimulovaná energie za celý den za ideálních podmínek při skutečném pohybu Slunce

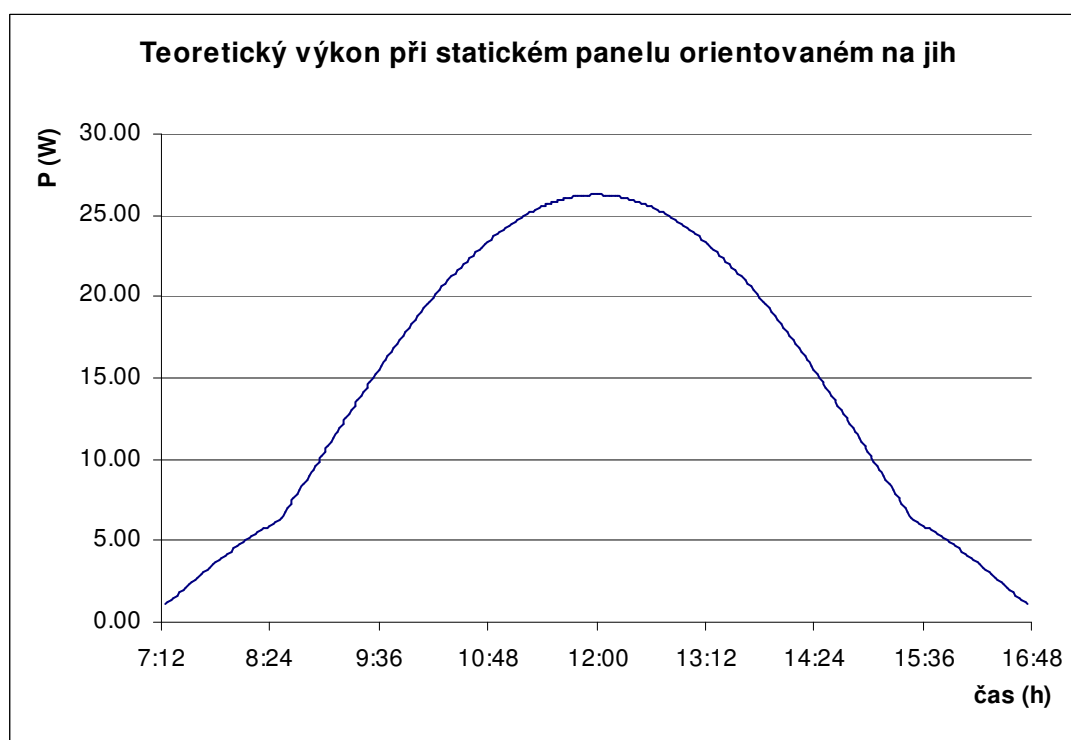
E_{max} - maximální energie, kterou by šlo z panelu získat, pokud by panel dodával po celý den 26W

V předchozích tabulkách (Tabulka 14.7 a Tabulka 14.8) je vidět, že při ideálních podmínkách může daný fotovoltaický panel teoreticky dodávat přibližně jednou tolik energie, než bylo naměřeno. V porovnání s hodnotou E_{max} , která je však nereálná, pouze teoretická, je to až 3,5x.

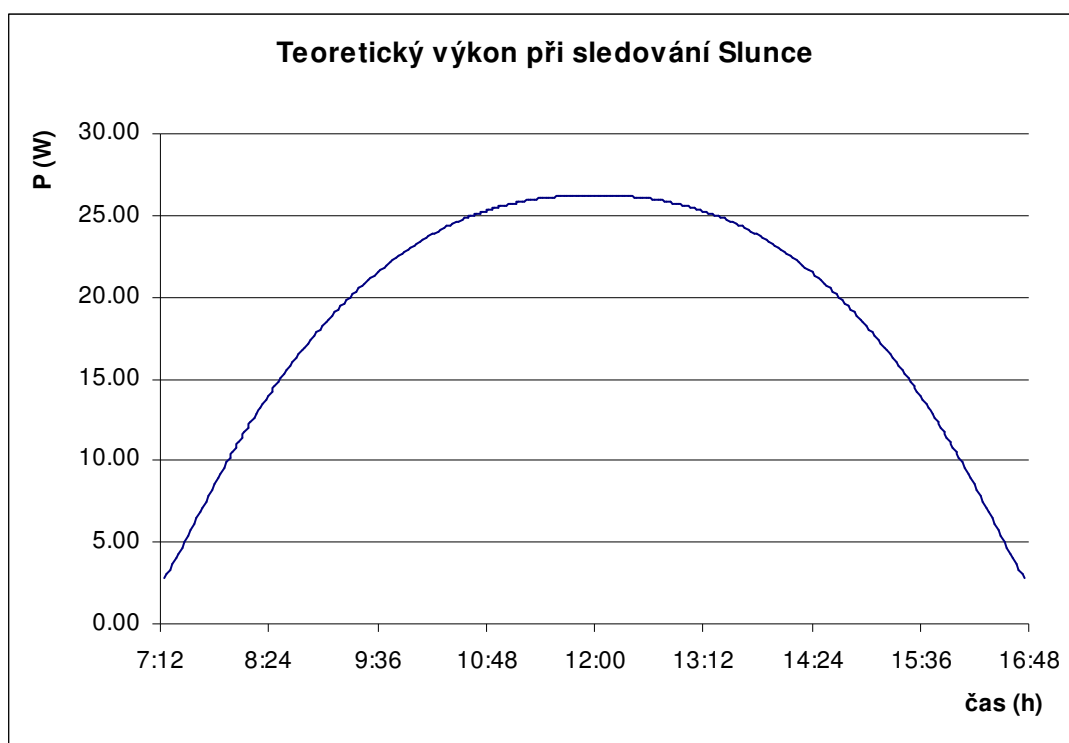
Na následujících grafech je zobrazen teoretický výkonový průběh řízeného a statického fotovoltaického panelu pro řízení dle Slunce a řízení dle času, vztažený k datu provedeného měření v kapitolách 12 a 13, ze kterého byla určena hodnota E_{sim} .



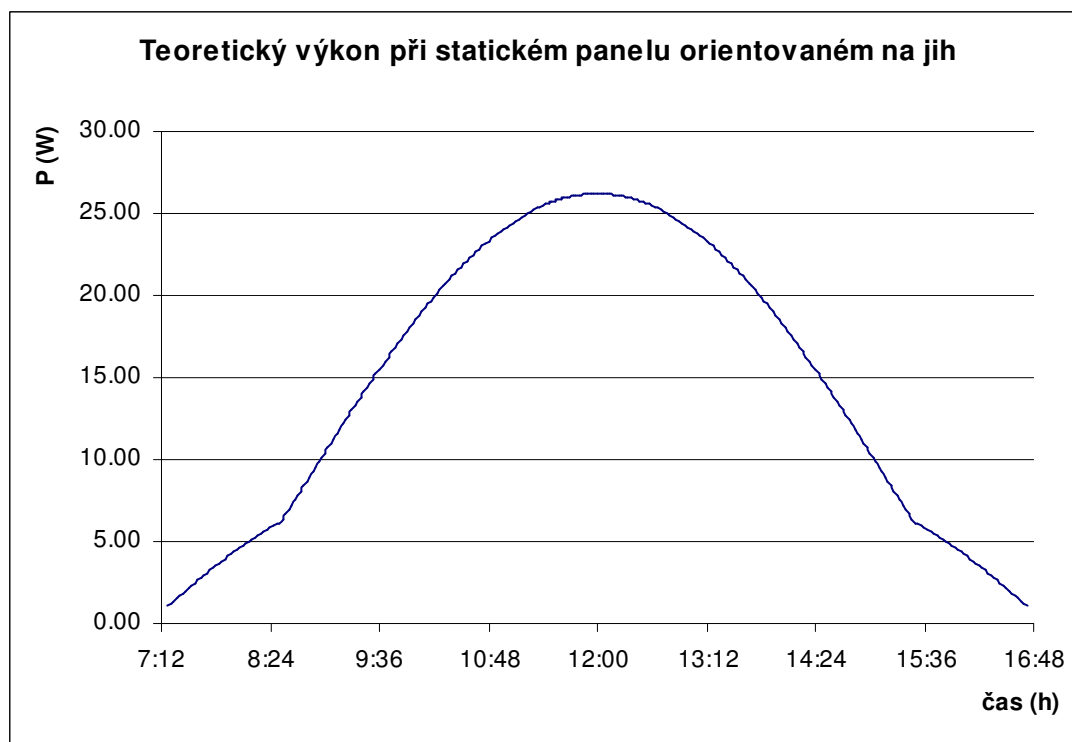
Obrázek 14.5 – Teoretický výkon při sledování Slunce vztažený k řízení dle Slunce ze dne 7.5.2006



Obrázek 14.6 - Teoretický výkon statického panelu vztažený k řízení dle Slunce ze dne 7.5.2006



Obrázek 14.7 - Teoretický výkon při sledování Slunce vztažený k řízení dle času ze dne 8.5.2006



Obrázek 14.8 - Teoretický výkon statického panelu vztažený k řízení dle času ze dne 8.5.2006

14.5 Souhrn porovnávaných hodnot

druh řízení	provoz	řízený panel [Wh]	neřízený panel [Wh]	získaný výkon [%]
dle času	letní	109,2	98,5	11
	zimní	99,5	77,5	22
dle Slunce	letní	129,7	102,9	21
	zimní	104,8	82,7	21

Tabulka 14.9 – Souhrn naměřených dat pro řízení dle času a dle Slunce v letním a zimním provozu

V předchozí tabulce (Tabulka 14.9) jsou zpracovány naměřené hodnoty z měření na fotovoltaických panelech. Většina naměřených dat, kromě letního měření při řízení dle času, vykazuje přibližně 20% energetický nárůst získaný řízením.

Letní měření, které zde bylo zobrazeno a vyhodnoceno ukazuje, jak jsou fotovoltaické panely přímo závislé na sluneční aktivitě. Při tomto měření byla obloha částečně zatažena místní oblačností a protože při řízení dle času panel neúnavně sleduje oblohu a nastavuje panel do polohy, kde Slunce právě očekává, nejsou hodnoty příliš uspokojivé v porovnání s měřením dle aktuální polohy Slunce.

Při řízení dle aktuální polohy Slunce je místní oblačnost eliminována tím, že se panel natočí směrem, ze kterého přichází více slunečních paprsků a tudíž je výkonnost snížena, ale ne tolik, jako kdyby byl panel natočen k oblačnosti.

Je tedy možné říci, že pokud bude jasná obloha, tak oba dva způsoby natáčení budou shodné a budou dodávat přibližně stejnou energii. Tato energie bude přibližně o 20% vyšší z panelů řízených než z panelů neřízených.

Pokud bude na obloze lokální oblačnost, panel řízený dle času sníží svou dodávanou energii. Tato energie bude pořád řádově o 10% vyšší oproti neřízenému panelu.

Při řízení dle aktuální polohy Slunce a lokální oblačnosti si model řízení dokáže částečně poradit s oblačností způsobem, že natočí svou aktivní plochu do míst, ze kterých může získat více energie. Dodávaná energie mírně klesne v závislosti na hustotě lokální oblačnosti.

Pokud je obloha zatažena, není nutné panely řídit. Jak je výše ukázáno, výkonové hodnoty získávané z fotovoltaických panelů jsou za těchto podmínek totožné, tj. řízený panel dodává stejné hodnoty jako panel neřízený. Při takovýchto podmínkách je výhodnější řízení dle skutečné polohy Slunce, neboť se model natočí a nespotřebovává energii. Model dle času i v takových podmínkách celým systémem natáčí a je tedy nevýhodný.

15 Zhodnocení využitelnosti řízení v ČR pro oblast Liberecka

Po zhodnocení obou typů řízení a porovnání s neřízeným panelem je zřejmé, že se při použití řízení dostane vyšší výkon, a to v rozmezí 10 – 20%. Toto rozmezí, jak bylo zjištěno dlouhodobějším pozorováním, závisí především na míře denní oblačnosti. Záleží také na tom, zda-li je zatažená celá obloha nebo jen mraky zastiňují přímý svit Slunce.

Po takovém zjištění již závisí na každém konstruktérovi, jaký druh pohybového mechanismu zvolí. Každý může mít svůj vlastní návrh, jak realizovat natáčecí mechanismus, ale hlavním hnacím motorem všech, je získání co největšího množství energie za vynaložení co nejmenších nákladů.

V popisovaných modelech bylo navržené řízení značně naddimenzované. Pro jeden panel o velikosti přibližně 1x0,5m by bohatě postačily méně výkonné motory. Krokový motor dokázal vyvinout kroutící moment 11Nm a stejnosměrný motor s integrovaným převodem 10Nm. Pro připevněný panel na rámu, jejichž celková hmotnost byla 15kg jsou tyto pohonné jednotky opravdu dosti naddimenzované. Bylo by výhodnější, kdyby při stávajícím použití pohonů bylo připojeno například 10 panelů o stejné velikosti. Tím by energetická náročnost zůstala, ale výkon by se rapidně zvýšil.

Vzhledem k tomu, že všechna měření byla provedena v centru Liberce, budou tyto závěry vztaženy na město Liberec. Z několikaletého pozorování počasí v oblasti Liberce, konkrétně po dobu těchto výzkumů (4 roky), bylo zjištěno, že poměr jasných dnů a dnů se zataženou oblohou, či s místní oblačností, je velmi nízký. Tzn., že jasných dnů je mnohem méně, než dnů s výskytem oblačnosti. Z tohoto hlediska není Liberec jako oblast pro celkové použití fotovoltaických panelů příliš výhodný. V zimních měsících Slunce svítí jen malou část dne, pokud vůbec svítí, v jarních měsících často prší a na podzim jsou opět vydatné deště. V některých letních měsících je obloha převážně bez oblačnosti. Jak je vidět ze všech uvedených grafů, hodnoty výkonů při zatažení jsou na úrovni jedné pětiny výkonu maximálního, tj. při plném osvětlení. Z hlediska výkonu je řízení za takovýchto podmínek více ztrátové, nežli výnosné. Dá se namítnout, že řízení dle Slunce se při takovýchto povětrnostních podmínkách nekoná, tj. že celý systém stojí. Pokud by systém stál po větší část roku, nabízí se otázka nutnosti tento systém vůbec zavádět, neboť jak již bylo zmíněno, při zatažené obloze nezáleží na směru natočení panelů a řízený i neřízený model dodává stejné množství energie.

Po zhodnocení všech zmiňovaných skutečností, není, dle mého názoru pro oblast Liberecka řízené natáčení fotovoltaických panelů výhodné. Stojí za zmínku, že do této oblasti bych nedoporučil ani neřízené fotovoltaické panely, neboť jejich (avizovaná) ekonomická návratnost se v těchto podmínkách značně snižuje a z řečených 7 – 10 (www.solaratec.cz) let se může rázem stát 15 – 20 let. Ovšem jinak tomu bude ve vyšších polohách, kde například v Jizerských horách jsou na některých chatách umístěny tyto panely na střechách. Bylo zjištěno, že při inverzích a při nízké oblačnosti jsou tato místa nad nepříjemnou oblačností, a tudíž se jejich návratnost může pohybovat v mezích garantovaných dodavatelem. Na druhou stranu, fotovoltaické panely se pro získávání elektrické energie používají zejména v místech, kde není dostupná rozvodná elektrická síť, a tudíž je jediným zdrojem elektrické energie. V takovýchto případech lze tento způsob získávání energie jen podpořit.

16 Ekonomické zhodnocení řízeného natáčení panelů

V případě, že se vlastník fotovoltaických panelů rozhodne, že bude získanou elektrickou energii využívat, má dvě možnosti.

První je uzavřít smlouvu s distributorem elektřiny nebo s Českou přenosovou soustavou, mají povinnost od nich elektřinu vykupovat za státem dotovanou cenu 13,2Kč za 1kWh, což je přibližně čtyřnásobek, než kolik se platí za spotřebu. Zákon garantuje, že v následujícím roce cena klesne maximálně o 5%. To se však vztahuje pouze na zařízení spuštěná po 1. 1. 2006.

Druhou možností je najít zákazníka a dodávat mu elektřinu pomocí veřejné rozvodné sítě. V tomto případě je elektřina prodávána za tržní cenu a od distributora získáte tzv. „zelený bonus“ v podobě příplatku 12,6Kč za 1kWh.

Existuje možnost zažádat si o dotaci u České energetické agentury. Podmínkou je však energetický audit a lze získat až 30% nákladů, maximálně však 3 milióny korun.

Pokud jsou výše zmíněné podmínky výkupu či prodeje elektrické energie aplikovány s přihlédnutím k předchozím podkapitolám s energetickým vyhodnocením, lze na tyto laboratorní modely uplatnit následující výpočty.

16.1 Výpočet s výkony z letního provozu fotovoltaických panelů

Řízení dle času:

	Řízený panel	Neřízený panel
Získaný výkon [Wh]	109.2	98.5
Výkupní cena	13.2 Kč	13.2 Kč
Bonus za prodej	12.6 Kč	12.6 Kč
Tržní cena	3.0 Kč	3.0 Kč
Zisk za výkup	1.44 Kč	1.30 Kč
Zisk z prodeje	1.70 Kč	1.54 Kč

Tabulka 16.1 – Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle času, letní provoz

Z předchozí tabulky je vidět, že energetický rozdíl je přibližně 10%. Po vypočtení rozdílu zisku, je opět 10%.

Pokud bude výkon z letního měření uvažován jako průměrný výkon za celý rok, je možné provést výpočet zisku za 1 rok a poté ekonomickou návratnost fotovoltaického panelu, jehož pořizovací cena byla 6000Kč.

Neřízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.30 = 474,5 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{474,5} = 12,6 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1.54 = 562,1 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{562,1} = 10,6 \text{ roku}$$

Řízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.44 = 525,6 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{525,6} = 11,4 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1.70 = 620,5 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{620,5} = 9,6 \text{ roku}$$

Řízení dle Slunce:

	Řízený panel	Neřízený panel
Získaný výkon [Wh]	129.7	102.9
Výkupní cena	13.2 Kč	13.2 Kč
Bonus za prodej	12.6 Kč	12.6 Kč
Tržní cena	3.0 Kč	3.0 Kč
Zisk z výkupu	1.71 Kč	1.36 Kč
Zisk z prodeje	2.02 Kč	1.61 Kč

Tabulka 16.2 - Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle Slunce, letní provoz

Z předchozí tabulky je vidět, že energetický rozdíl je přibližně 20%. Pokud vypočteme rozdíl zisku, dostaneme se opět k 20%.

Lze tedy říci, že výkonový procentuální rozdíl řízeného a neřízeného panelu, jak je vidět v předcházejících tabulkách, je přibližně stejný, jako ekonomický zisk.

Pokud bychom brali tento výkon z letního měření jako průměrný výkon za celý rok, můžeme provést výpočet zisku za 1 rok a poté ekonomickou návratnost fotovoltaického panelu.

Neřízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.36 = 496,4 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{496,4} = 12 \text{ let}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1.61 = 587,65 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{587,65} = 10,2 \text{ roku}$$

Řízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.71 = 624,15 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{624,15} = 9,6 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 2,02 = 737,3 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{737,3} = 8,1 \text{ roku}$$

16.2 Výpočet s výkony ze zimního provozu fotovoltaických panelů

Řízení dle času:

	Řízený panel	Neřízený panel
Získaný výkon [Wh]	99.5	77.5
Výkupní cena	13.2 Kč	13.2 Kč
Bonus za prodej	12.6 Kč	12.6 Kč
Tržní cena	3.0 Kč	3.0 Kč
Zisk za výkup	1.33 Kč	1.02 Kč
Zisk z prodeje	1.55 Kč	1.20 Kč

Tabulka 16.3 – Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle času, zimní provoz

Pokud bude výkon ze zimního měření uvažován jako průměrný výkon za celý rok, je možné provést výpočet zisku za 1 rok a poté ekonomickou návratnost fotovoltaického panelu, jehož pořizovací cena byla 6000Kč.

Neřízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.02 = 372,3 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{372,3} = 16,1 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1.20 = 438 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{438} = 13,7 \text{ roku}$$

Řízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.33 = 485,4 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{485,4} = 12,3 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1.55 = 565,7 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{565,7} = 10,6 \text{ roku}$$

Řízení dle Slunce:

	Řízený panel	Neřízený panel
Získaný výkon [Wh]	104.8	82.7
Výkupní cena	13.2 Kč	13.2 Kč
Bonus za prodej	12.6 Kč	12.6 Kč
Tržní cena	3.0 Kč	3.0 Kč
Zisk z výkupu	1.38 Kč	1.01 Kč
Zisk z prodeje	1.63 Kč	1.29 Kč

Tabulka 16.4 - Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle Slunce, letní provoz

Pokud bychom brali tento výkon ze zimního měření jako průměrný výkon za celý rok, můžeme provést výpočet zisku za 1 rok a poté ekonomickou návratnost fotovoltaického panelu.

Neřízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.01 = 368,6 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{368,6} = 16,2 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1.29 = 470,85 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{470,85} = 12,7 \text{ roku}$$

Řízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.38 = 503,7 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{503,7} = 11,9 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1,63 = 595 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{595} = 10 \text{ let}$$

16.3 Výpočet s použitím průměrného výkonu za letní a zimní provoz

Řízení dle času:

	Řízený panel	Neřízený panel
Průměrný výkon [Wh]	104.3	88
Výkupní cena	13.2 Kč	13.2 Kč
Bonus za prodej	12.6 Kč	12.6 Kč
Tržní cena	3.0 Kč	3.0 Kč
Zisk za výkup	1.37 Kč	1.16 Kč
Zisk z prodeje	1.62 Kč	1.37 Kč

Tabulka 16.5 – Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle času, průměrné výkony z letního a zimního měření

Pro získání hodnot, které se budou nejvíce blížit skutečným hodnotám, je nutné vypočítat návratnost panelu z průměrných hodnot ze zimního a letního provozu. Nyní můžeme provést výpočet zisku za 1 rok a poté ekonomickou návratnost fotovoltaického panelu, jehož pořizovací cena byla 6000Kč.

Neřízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.16 = 423,4 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{423,4} = 14,1 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1.37 = 500 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{500} = 12 \text{ let}$$

Řízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.37 = 500 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{500} = 12 \text{ let}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1.62 = 592,3 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{592,3} = 10,1 \text{ roku}$$

Řízení dle Slunce:

	Řízený panel	Neřízený panel
Průměrný výkon [Wh]	117.25	92.8
Výkupní cena	13.2 Kč	13.2 Kč
Bonus za prodej	12.6 Kč	12.6 Kč
Tržní cena	3.0 Kč	3.0 Kč
Zisk za výkup	1.54 Kč	1.22 Kč
Zisk z prodeje	1.82 Kč	1.44 Kč

Tabulka 16.6 – Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle Slunce, průměrné výkony z letního a zimního měření

Pro získání hodnot, které se budou nejvíce blížit skutečným hodnotám, je nutné vypočítat návratnost panelu z průměrných hodnot ze zimního a letního provozu. Nyní můžeme provést výpočet zisku za 1 rok a poté ekonomickou návratnost fotovoltaického panelu, jehož pořizovací cena byla 6000Kč.

Neřízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.22 = 445,3 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{445,3} = 13,4 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1.44 = 525,6 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{525,6} = 11,4 \text{ roku}$$

Řízený panel:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1.54 = 562,1 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{562,1} = 10,6 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1.82 = 664,3 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{6000}{664,3} = 9 \text{ let}$$

16.4 Výkon odebraný řídicím systémem

Pohon pro model dle Slunce je, jak již bylo zmíněno, stejnosměrný motor se šnekovou převodovkou. Tento motor je napájen 24Vss a maximální proudový odběr má 2A. Z toho lze usoudit, že výkon potřebný k pootáčení jednu hodinu je 48Wh. Citlivost modelu je nastavena tak, že model se pootočí za Sluncem každých 10–15 minut (záleží na intenzitě osvětlení) a otáčí se přibližně 1s, jinak není motor napájen. Kdybychom počítali s pootočením jednou za 10 minut, bylo by v ročním průměru (10 hodin Slunce denně) za den pootočeno 60x. Z toho lze vypočítat, že energie potřebná k tomuto pootočení je následující:

$$P_o = \frac{48 \cdot 60}{3600} = 0,8Wh$$

a energie odebraná za 1 rok je:

$$P_r = 0,8 \cdot 365 = 292Wh \cdot rok^{-1}$$

Pro zjednodušený přepočet v následujících kapitolách bude nyní určeno, o kolik let bude prodloužena návratnost při použití zmíněného řízení.

Odebraný výkon za 1 rok při výkupu:

$$C_v = 292 \cdot 13,2 = 3,85Kč$$

Odebraný výkon za 1 rok při prodeji:

$$C_p = 292 \cdot 15,6 = 4,55Kč$$

Z předchozích výpočtů lze usoudit, že výkon odebraný k pootáčení systému je zanedbatelný vůči výkonu vyrobenému (i když je použit i méně výkonný panel) a návratnost panelu se zvýší, ale jen málo, v řádu dnů.

Druhou stranou řízení je návratnost řídicí jednotky, pohonu a rámu. Motor a rám jsou vhodně zvoleny tak, aby mohly být použity i na větší panely s vyšším výkonem. Pohon, skládající se z motoru a převodovky byl pořízen za cenu 4500Kč a rám byl pořízen za 250Kč. Cena celkově je tedy 4750Kč. Druhou částí je řídicí jednotka. V tomto případě bylo zvoleno PLC od fy. Amit kvůli možnosti sledování řízení a měření panelu z internetu, ale pro tento typ řízení by stačil i logický obvod s dvěma spínacími výkonovými tranzistory. Cena PLC je 8500Kč, naproti tomu cena logických hradel, odporů a tranzistorů se i v horším případě může pohybovat do 1000Kč.

Dobu návratnosti řídicího zařízení můžeme tedy určit následně

$$N_d = \frac{5750}{Z_r} \text{ [rok]}$$

kde Z_p je zisk z daného typu řízení za 1 rok.

Nyní lze určit celkovou dobu návratnosti řídicí jednoty a z toho i celkovou návratnost řídicího systému za daných podmínek. Návratnost je počítána pro jeden panel, ale v případě řídicí jednotky, by mohla být vypočtena její návratnost vzhledem k systému, který řídí obrovské množství panelů, například fotovoltaická elektrárna. Poté může vycházet návratnost ceny takovéto jednotky na zanedbatelnou částku.

16.4.1 Rentabilita nákladů pro letní provoz

Řízení dle času:

Zisk za 1 rok za výkup = $525,6 - C_v = 521,75$ Kč

Návratnost panelu po odečtení výkonu = $\frac{6000}{521,75} = 11,5$ roku

Zisk za 1 rok z prodeje = $620,5 - C_p = 615,95$ Kč

Návratnost panelu po odečtení výkonu = $\frac{6000}{615,95} = 9,7$ roku

Návratnost řídicí jednotky:

Návratnost při ceně za výkup = $\frac{5750}{521,75} = 11$ let

Návratnost při ceně za prodej = $\frac{5750}{615,95} = 9,3$ roku

Řízení dle slunce:

Zisk za 1 rok za výkup = $624,15 - C_v = 620,3$ Kč

Návratnost panelu po odečtení výkonu = $\frac{6000}{620,3} = 9,6$ roku

Zisk za 1 rok z prodeje = $737,3 - C_p = 732,75$ Kč

$$\text{Návratnost panelu po odečtení výkonu} = \frac{6000}{732,75} = 8,2 \text{ roku}$$

Návratnost řídicí jednotky:

$$\text{Návratnost při ceně za výkup} = \frac{5750}{620,35} = 9,2 \text{ roku}$$

$$\text{Návratnost při ceně za prodej} = \frac{5750}{732,75} = 7,8 \text{ roku}$$

16.4.2 Rentabilita nákladů pro zimní provoz

Řízení dle času:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 485,4 - C_v = 481,55 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu po odečtení výkonu} = \frac{6000}{481,55} = 12,4 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 565,7 - C_p = 561,15 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu po odečtení výkonu} = \frac{6000}{561,15} = 10,7 \text{ roku}$$

Návratnost řídicí jednotky:

$$\text{Návratnost při ceně za výkup} = \frac{5750}{481,55} = 11,9 \text{ roku}$$

$$\text{Návratnost při ceně za prodej} = \frac{5750}{561,1} = 10,2 \text{ roku}$$

Řízení dle slunce:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 503,7 - C_v = 499,85 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu po odečtení výkonu} = \frac{6000}{499,85} = 12 \text{ let}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 595 - C_p = 590,45 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu po odečtení výkonu} = \frac{6000}{590,45} = 10,1 \text{ roku}$$

Návratnost řídicí jednotky:

$$\text{Návratnost při ceně za výkup} = \frac{5750}{499,85} = 11,5 \text{ roku}$$

$$\text{Návratnost při ceně za prodej} = \frac{5750}{590,45} = 9,7 \text{ roku}$$

16.4.3 Rentabilita nákladů pro průměrný výkon z letního a zimního provozu

Řízení dle času:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 500 - C_v = 496,15 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu po odečtení výkonu} = \frac{6000}{496,1} = 12 \text{ let}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 592,3 - C_p = 587,75 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu po odečtení výkonu} = \frac{6000}{587,75} = 10,2 \text{ roku}$$

Návratnost řídicí jednotky:

$$\text{Návratnost při ceně za výkup} = \frac{5750}{496,1} = 11,6 \text{ roku}$$

$$\text{Návratnost při ceně za prodej} = \frac{5750}{587,75} = 9,7 \text{ roku}$$

Řízení dle slunce:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 562,1 - C_v = 558,25 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu po odečtení výkonu} = \frac{6000}{558,25} = 10,7 \text{ let}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 664,3 - C_p = 659,75 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu po odečtení výkonu} = \frac{6000}{659,75} = 9 \text{ let}$$

Návratnost řídicí jednotky:

$$\text{Návratnost při ceně za výkup} = \frac{5750}{558,25} = 10,3 \text{ roku}$$

$$\text{Návratnost při ceně za prodej} = \frac{5750}{659,75} = 8,7 \text{ roku}$$

Z předešlých výsledků je vidět, že při výkupu elektřiny, který je snadnější, se celý systém vrátí za delší dobu při prodeji elektřiny, kde si odběratele musí prodávající najít sám.

Výrobci garantují 20 let neměnných parametrů u fotovoltaického panelu. Lze tedy říci, že při použití těchto panelů o jmenovitém výkonu 26W je návratnost panelu na těsné hranici, protože při sečtení návratnosti panelu a řídicí jednotky při průměrných hodnotách se jejich návratnost blíží k zmíněným dvaceti letům.

Pokud by však na místo panelu o výkonu 26W byl použit například panel o výkonu 100W (cena 11000Kč), dostali bychom následující výsledky návratnosti celého systému při řízení dle času a průměrných hodnotách za letní a zimní provoz (po přepočtu získaného výkonu na 100W panel):

Návratnost panelu při řízení dle Slunce:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 558,25 \cdot \frac{100}{26} = 2147,15 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu s řízením} = \frac{11000 + 5750}{2147,15} = 7,8 \text{ roku}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 659,75 \cdot \frac{100}{26} = 2537,5 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu s řízením} = \frac{11000 + 5750}{2537,5} = 6,6 \text{ roku}$$

Pokud bychom tedy zaměnili fotovoltaický panel s výkonem 26W za 100W, návratnost by se rapidně snížila a již po šestém až sedmém roce provozu začne celý systém vydělávat v závislosti na způsobu prodeje elektrické energie.

Pro porovnání, výkon neřízeného panelu za stejných podmínek pro panel 100W:

$$\text{Zisk za 1 rok za výkup} = 365 \cdot 1,22 \cdot \frac{100}{26} = 1712,65 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{11000}{1712,65} = 6,4 \text{ let}$$

$$\text{Zisk za 1 rok z prodeje} = 365 \cdot 1,44 \cdot \frac{100}{26} = 2021,5 \text{ Kč}$$

$$\text{Návratnost panelu} = \frac{11000}{2021,5} = 5,4 \text{ roku}$$

Při porovnání řízeného a neřízeného systému je vidět, že neřízený systém má návratnost přibližně o rok dříve, než systém řízený.

Pokud by zařízení fungovalo stejně po dobu 20 let, zisk z řízeného a neřízeného by byl následující:

Řízený při ceně za výkup: $zisk = 2147,15 \cdot 20 = 42923 \text{ Kč}$

Neřízený při ceně za výkup: $zisk = 1712,65 \cdot 20 = 34253 \text{ Kč}$

Rozdíl zisků řízeného a neřízeného panelu je roven 8670 Kč, tj. řízený model je výnosnější nežli neřízený model. Přihlédneme-li však k poruchovosti jednotlivých částí, nebo jen samotné údržbě, která musí být prováděna, zisk 8670 Kč není za 20 let provozu tak veliký. Po této ekonomické rozvaze lze říci, že řízení panelů s nízkým výkonem se nevyplatí, neboť jejich návratnost je vůči pořizovacím nákladům na řídicí systém malá. Řízení bych tedy doporučil jen u fotovoltaických panelů s vyšším výkonem, nebo u soustavy panelů. V opačném případě je lepší použít panelů statických, s možností ruční změny sklonu.

Závěr práce

Pro řízené natáčení fotovoltaických panelů a porovnání jejich účinnosti oproti panelům neřízeným, nebo řízeným způsobem natáčení kolem vertikální či horizontální osy, ručně nebo automaticky, bylo potřeba provést řadu dílčích kroků tak, aby výsledek byl co nejpřesnější a téma srozumitelně popsáno a vysvětleno.

Nejprve bylo potřeba prostudovat literaturu zabývající se problematikou fotovoltaických panelů, porovnat možnosti a rozvážit postup další práce. Konkrétně bylo potřeba detailně se seznámit s účinností fotovoltaických panelů, materiály, které se používají k jejich konstrukci, s materiály PN přechodů, možnostmi jejich zapojení k síti, stejně jako závislosti jejich výkonu na přírodních faktorech. Pro natáčení fotovoltaických panelů je velice důležitý výpočet sluneční deklinace a délky dne pro každý den v roce. Pro tyto výpočty jsem odvodil vzorce, ze kterých jsem stanovil také čas západu a východu slunce. Pro správné odvození vzorců bylo nezbytné dobré pochopení problematiky, aby odvozené vztahy mohly být použity pro další výpočty a nedocházelo ke zkreslení výstupů a chybným závěrům. K ověření správnosti výsledků výpočtů z mnou navržených vzorců jsem využil výsledky získané použitím metody popsané v knize „Solární tepelná technika“ (Cihelka, 1994). Porovnáním obou způsobů jsem zjistil, že hodnoty sluneční deklinace vypočtené mnou navrženým způsobem jsou o čtyři desetiny stupně nižší, než hodnoty získané dle Cihelky. Tento rozdíl je pro natáčení fotovoltaických panelů zanedbatelný, vzhledem k přesnosti (1°), jakou lze pomocí mnou navrženého polohovacího systému natočit fotovoltaický panel ke Slunci.

Dále jsem navrhl způsob možného řízeného natáčení fotovoltaického panelu za využití dvou malých pomocných řídicích fotovoltaických panelů. Zakoupení fotovoltaických panelů a dalších součástí potřebných ke konstrukci celého systému bylo podpořeno grantem FRVŠ, který jsem získal na jaře 2005. Zkonstruoval jsem dva modely natáčení fotovoltaických panelů, první dle skutečné polohy Slunce a druhý dle času. Po sestavení fotovoltaických panelů jsem zkonstruoval měřicí obvod pro měření napětí a proudu fotovoltaického panelu a to ve dvou kusech. Ověřil jsem funkčnost modelů řízení. Oba tyto modely jsem využil k dosažení hlavního cíle této práce, tj. porovnání výkonů získaných z fotovoltaických panelů natáčených, nebo pevně uchycených. Posouzení rozdílu výkonů fotovoltaických modelů jsem provedl dvěma rozdílnými přístupy. Nejprve jsem provedl porovnání výkonů z obou metod řízeného natáčení s výkonem získaným z panelu, který byl pevně připevněn. Následně jsem

vzájemně srovnal výstupní výkony řízených modelů. Z opakovaných měření jsem mohl získat potřebná data pro kvalifikovaný odhad účinnosti jednotlivých modelů. Při použití řízeného natáčení fotovoltaického panelu, jak dle času, tak dle aktuální polohy Slunce, jsem zjistil, že tento řízený panel dodává přibližně o 20% více energie než panel neřízený, který byl pevně připevněn a orientován k jihu po celý den. Těchto 20% výkonu navíc bylo získáno v ranních a odpoledních hodinách. Ovšem porovnáním výkonů řízených panelů dle času a dle aktuální polohy Slunce, jsem zjistil, že získané hodnoty jsou téměř shodné. Nezáleží tedy příliš na zvoleném způsobu natáčení fotovoltaických panelů. Toto platí pro měření prováděné za jasného počasí, nebo za počasí s minimální oblačností. Provedl jsem také porovnání dat naměřených při zvětšené oblačnosti. Zjistil jsem, že za takových podmínek dodává jak řízený panel, tak neřízený panel přibližně stejné výkony. Z tohoto usuzuji, že v tomto případě, když je zvýšená oblačnost, nezáleží na natočení fotovoltaického panelu. Pokud ale není zcela zataženo a oblačnost je jen místní, je natáčení panelu dle aktuální polohy slunce účinnější než natáčení panelu dle času. Zjistil jsem, že tato skutečnost je dána tím, že panel řízený dle času je v době, kdy je slunce zastíněno, otočen přímo směrem ke Slunci, zatímco panel natáčený dle skutečné polohy slunce se otočí do místa, odkud může v daný okamžik získat největší výkon.

Z uvedených poznatků je vidět, že natáčení fotovoltaických panelů je v případě, že jsou panely umístěné ve slunné lokalitě bez jakéhokoli zastínění jejich plochy v průběhu dne, vhodným způsobem využití sluneční energie. Za takto definovaných podmínek, mohu na základě výsledků této práce doporučit metodu natáčení dle skutečné polohy Slunce. Tento způsob není závislý na poloze měřicího místa na Zemi a lze ho využít prakticky kdekoli. Navíc má tu výhodu, že v případě nepříznivého počasí se systém nepohybuje a nespotřebovává tak na své natáčení elektrickou energii. V lokalitách s častějším výskytem oblačnosti, nebo v zeměpisných šířkách, kde Slunce svítí méně, bych se spíše přikláněl k panelům neřízeným, případně k panelům nastavovaným kolem horizontální osy do různých poloh s ohledem na roční období (nikoli už na denní dobu, či polohu Slunce). Je také potřeba rozlišovat mezi panely z hlediska výkonu, který mohou dodávat. Je výhodné používat panely s co nejvyšším dodávaným výkonem, jedině tak se fotovoltaické systémy vyplácejí. Panel použitý pro demonstraci účinnosti různých typů řízeného natáčení, měl výkon 26W, řízení takto nízkovýkonového panelu se nevyplatí. Rentabilní systém by měl mít výkon alespoň 100 W – takový panel je již ekonomicky zajímavější.

Fotovoltaika je jistě dynamicky rozvíjející se energetickou oblastí, avšak její využití v místech s podobným podnebím, jako je v České republice není příliš výhodné. Elektrická energie vyrobená fotovoltaickými panely je, vzhledem k pořizovací ceně panelů, velice drahá a v České republice výhodná jen v tzv. ostrovních systémech, nebo pro získávání elektrické energie v obytných vozech. Dá se říci, že fotovoltaika je výhodnou alternativou k jiným zdrojům energie pouze v oblastech s vyšší intenzitou slunečního svitu – v Evropě např. ve Středomoří.

Věřme však, že použití fotovoltaiky bude nadále podporované jak ze strany EU, tak ze strany samotné ČR a všech jejích obyvatel, kterým není jedno, co se s planetou Země děje.

Literatura

- 1) Adil Lari,A.:Czech-Austrian Energy Partnership, In:*Conference proceedings Sustainable building & solar energy*, Praha, 2001
- 2) Bulletin,J.W.,Wild,R.D:Modeling of the solar irradiation on flat plate collectors augmented with planar reflectors, In:*Solar energy Vol.55*, 1996
- 3) Cihelka, J.: Solární tepelná technika, nakladatelství T. Malina, Praha 1994
- 4) Cihelka,J.:Energie dopadající na sluneční kolektory v méně obvyklé poloze, In: *Zdravotní technika vzduchotechnika*, r.24, č.4, Academia Praha, 1983
- 5) Cihelka,J.: Sluneční vytápěcí systémy, SNTL, Praha, 1985
- 6) Cihelka,J.:Vytápění budov a ohřívání užitkové vody energií slunečního záření, In: *Zdravotní technika a vzduchotechnika*, r.21, č.2, Academia Praha, 1978
- 7) Elsner,N.:Grundladen der Technischen Thermodynamik,Akademie Verlag Berlin, 1993
- 8) Goossen,D.,Kerschavever,E.:Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells, In: *Solar Energy Vol. 66*, No.4, 1999
- 9) Jancarle L. Santos, Fernando L. M. Antones: Maximum Power Point Trackers for PV-Systems, In:*World and Climat Energy Event*, Rio de Janeiro, Brasil, 2003
- 10) Kasap, S. – pn Junction:the Shockley model, eBooklet at www.material.usak.ca, University of Saskatchewan, Canada, 2001
- 11) Kalgirou,A.S.:Design and construction of one-axis sun-tracking sytem, In: *Solar Energy Vol.57*, No.6, 1996
- 12) Klaus Jens,A.:Photovoltaic power plants JENS, In: *Conference proceedings Sustainable building & solar energy*, Praha, 2001
- 13) Quaschining,V.Hanitsch,R.:Irridation calculation on sheded surfaces, In: *Solar Eneergy Vol. 62*, No.5, 1998
- 14) Olehla, M., Olehla J.: Basic u Mikropočítačů, Praha, NADAS 1988
- 15) Olehla, P.: Netradiční zdroje energie – fotovoltaické články, DP, Liberec, 2002
- 16) Oliva, P.: Laboratorní model řízení fotovoltaických článků, DP, Liberec 2003
- 17) Kolektiv autorů : Obnovitelné zdroje energie, FCC Public, Praha 2001, ISBN 80-901985-8-9
- 18) Poulek,V.,Libra,M.: Fotovoltaické solární systémy s oboustrannými panely, In: *Jemná mechanika a optika*, 47, 2/2002
- 19) Libra, M., Poulek V. – Solární energie, ČZU Praha, 2006, ISBN 80-213-1488-5

- 20) Poulek,V.,Libra,M.: Zařízení pro orientaci kolektorů solární energie, In: *Jemná mechanika a optika*, 42, 9/2002
- 21) Shapiro,I.B., Tkachenko,N.N.:Current-Voltage characteristic of photovoltaic cells based on polycristine silicon, In:*Applied Solar Energy Vol.26*, No.2, 1990
- 22) Strnad E.:Předpověď počasí, Levné knihy KMa, Praha 2000, ISBN 80-8642500-2
- 23) Wagner,A.:Photovoltaik Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999

Firemní materiály:

- 1) AMIT s.r.o., firemní materiály, 2005
- 2) ČEZ, firemní materiály, 2005
- 3) Siemens a.s. – firemní materiály, 2003 a 2005
- 4) Solartec s.r.o., Firemní materiály, 2005

Webové stránky:

- 1) www.amit.cz
- 2) www.chmu.cz
- 3) www.eurosolar.cz
- 4) www.fh-zwickau.de
- 5) www.homepower.com
- 6) www.i-ekis.cz
- 7) www.powerdesigners.com
- 8) www.pre.cz
- 9) www.shell.com
- 10) www.siemens.de
- 11) www.solarpower.cz
- 12) www.solartec.cz
- 13) www.solarenergy.com
- 14) www.solar-trackers.com
- 15) www.thinenergy.com
- 16) www.timnolan.com
- 17) www.tretipol.cz
- 18) www.stan.cap-net.cz
- 19) www.material.usak.ca

Seznam obrázků

Obrázek 3.1 - Proton-protonový řetězec	12
Obrázek 5.1 – Struktura polovodičů	25
Obrázek 5.2 – Princip fotovoltaické přeměny.....	26
Obrázek 5.3 – Vliv zrátk na celkovou účinnost solárního fotovoltaického článku.....	29
Obrázek 5.4 – Solární článek s lokalizovanou vrstvou poruch	29
Obrázek 5.5 – Schéma autonomního systému	30
Obrázek 5.6 – Schéma hybridního systému	30
Obrázek 5.7 – Schéma systému přímo připojeného do sítě	31
Obrázek 5.8 – Ukázka V-A charakteristiky teoretického fotovoltaického článku v závislosti na intenzitě osvětlení od 1000 Wm^2 do 200 Wm^2 , při konstantní teplotě.	32
Obrázek 5.10 – Náhradní schéma ideálního modelu.....	34
Obrázek 5.11 – Náhradní schéma standardního modelu.....	35
Obrázek 5.12 – Náhradní schéma standardního modelu.....	36
Obrázek 5.13 – Náhradní schéma modelu se dvěma diodami	37
Obrázek 5.14 – V-A charakteristika fotovoltaického článku, výpočet dle metody 2, vstupní data z tabulky 5.1	40
6.1 – Úvodní stránka aplikace „Fotovoltaika“	44
Obrázek 6.2 – Porovnání průběhů úhlu δ pro každý den v roce	46
6.3 – Stránka o sluneční deklinaci z aplikace „Fotovoltaika“.....	47
Obrázek 6.4 – Výška Slunce nad obzorem dne 22.6. zobrazená pro celý den.....	48
Obrázek 6.5 – Výška Slunce nad obzorem po celý rok ve 12 hodin.....	48
Obrázek 6.6 – Časová rovnice, rozdíl skutečného slunečního času a místního času	49
6.7 – Stránka o výšce Slunce nad obzorem z aplikace „Fotovoltaika“	50
Obrázek 6.8 – Azimut Slunce dne 22.6. od východu do západu Slunce.....	51
Obrázek 6.9 – Azimut Slunce v průběhu roku ve 13 hodin	51
6.10 – Stránka o azimutu Slunce z aplikace „Fotovoltaika“	52
Obrázek 6.11 – Porovnání délek dne pro každý den v roce	53
6.12 – Stránka o délce dne z aplikace „Fotovoltaika“.....	54
Obrázek 6.13 – Porovnání času východu Slunce pro každý den v roce.....	54
6.14 – Stránka o času východu Slunce z aplikace „Fotovoltaika“	55
Obrázek 6.15 – Čas západu Slunce pro každý den v roce.....	55
6.16 – Stránka o času západu Slunce z aplikace „Fotovoltaika“.....	56
Obrázek 6.17 – Porovnání časů východu a západu Slunce pro každý den v roce.....	56
Obrázek 7.1 - Globální sluneční záření na území ČR (MJ/m^2 za rok) (www.chmu.cz)	57
Obrázek 7.2 – Intenzita přímého slunečního záření dne 21.6., $Z=3$, $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$	60
7.3 – Stránka o intenzitě přímého záření z aplikace „Fotovoltaika“.....	61
Obrázek 7.4– Intenzita difusního záření pro tři různé polohy sklonu panelu, dne 21.6., $Z=3, \varphi=50^\circ, \lambda=15^\circ, r=0,2$	62
7.5 – Stránka o intenzitě difusního záření z aplikace „Fotovoltaika“	62
Obrázek 7.6 – Celková intenzita slunečního záření dne 21.6., $Z=3$, $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $r=0,2$	63
Obrázek 7.7 – Celková intenzita slunečního záření pro charakteristické dny., $Z=3$, $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $r=0,2$	64
7.8 – Stránka o celkové intenzitě slunečního záření z aplikace „Fotovoltaika“.....	64
Obrázek 7.9 – Závislost maximálního teoretického výkonu na znečištění atmosféry dne 21.6., $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $r=0,2$, $H=300$	65
Obrázek 7.10 - Závislost maximálního teoretického výkonu na albedu dne 21.6., $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $Z=3$, $H=300$	66

Obrázek 7.11 - Závislost maximálního teoretického výkonu na nadmořské výšce dne 21.6., $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$, $r=0,2$, $Z=3$	66
Obrázek 8.1 – Znázornění výpočtu délky stínu vrženého vodorovnou plochou.....	67
Obrázek 8.2 – Délka stínu vrženého vodorovnou plochou o šířce 15cm dne 21.6., $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$	68
Obrázek 8.3 – Znázornění výpočtu délky stínu vrženého svislou plochou.....	68
Obrázek 8.4 – Délka stínu vrženého svislou plochou o šířce 15cm dne 21.6., $\varphi=50^\circ$, $\lambda=15^\circ$.	69
Obrázek 9.1 – A-V charakteristika fotočlánku pro různé intenzity osvětlení a ukázky MPP bodů (černé body).....	70
Obrázek 9.2 – Schéma MPPT pro nabíjení akumulátoru	72
Obrázek 9.3 – Diagram řídicího obvodu	72
Obrázek 9.4 – Diagram kontrolního algoritmu (Jancarle, Fernando, 2003)	73
Obrázek 11.1 – Závislost teoretického výkonu panelu za celý rok na úhlu jeho sklonu, $Z=3$, $\varphi=50^\circ$	78
Obrázek 11.2 - Závislost teoretického výkonu panelu na úhlu jeho sklonu pro letní a zimní provoz, $Z=3$, $\varphi=50^\circ$	80
Obrázek 11.3 – Závislost teoretického výkonu panelu na úhlu jeho sklonu pro různá roční období, $Z=3$, $\varphi=50^\circ$	81
Obrázek 11.4 – Ukázka nastavení panelu a naplnění válců kapalinou při východu Slunce	83
Obrázek 11.5 – Znázornění natáčení panelu kolem vertikální osy pro ráno, poledne a večer.	85
Obrázek 11.6 – Schematické znázornění připevnění řídicího panelu k řízenému systému pro vertikální řízení	89
Obrázek 11.7 – Schematické znázornění připevnění řídicích panelů k řízenému systému	90
Obrázek 11.8 – Připojení pomocných fotovoltaických článků k motoru.....	92
Obrázek 11.9 – Schéma principu ovládání pomocným článkem	92
Obrázek 11.10 – Ukázka různých úhlů dopadajících paprsků na pomocný článek.....	93
Obrázek 12.1 – Konstrukční schéma řízeného modelu.....	95
Obrázek 12.2 – Vývojový diagram řídicího algoritmu	98
Obrázek 12.3 – Porovnání řízeného a neřízeného panelu: výkon, napětí a proud (řazeno shora)	100
Obrázek 12.4 - Porovnání výkonu řízeného a neřízeného panelu, zimní provoz.....	102
Obrázek 13.1 - Konstrukční schéma řízeného modelu.....	105
Obrázek 13.2 – Vývojový diagram algoritmu řízení.....	107
Obrázek 13.3 – Zjednodušené blokové schéma řízení.....	108
Obrázek 13.4 – Dráha pootočení panelu při rozdílech panelů (nasimulované vstupy pro dvě změny)	108
Obrázek 13.5 – Porovnání řízeného a neřízeného panelu: výkon, napětí a proud (řazeno shora), letní provoz.....	110
Obrázek 13.6 - Porovnání výkonu řízeného a neřízeného panelu, zimní provoz.....	111
Obrázek 14.1 – Porovnání výkonů řízených panelů dle času a dle polohy Slunce, ukončené měření v 17 hodin.....	113
Obrázek 14.2 – Porovnání výkonů řízeného a neřízeného panelu při velké oblačnosti pro vymezený časový úsek, dne 10. 6. 2006,	114
Obrázek 14.3 – Zidealizovaný průběh výkonů pro řízený panel dle času a neřízeného panelu	116
Obrázek 14.4 - Zidealizovaný průběh výkonů pro řízený panel dle polohy Slunce a neřízeného panelu	117
Obrázek 14.5 – Teoretický výkon při sledování Slunce vztažený k řízení dle Slunce ze dne 7.5.2006	121

Obrázek 14.6 - Teoretický výkon statického panelu vztažený k řízení dle Slunce ze dne 7.5.2006	121
Obrázek 14.7 - Teoretický výkon při sledování Slunce vztažený k řízení dle času ze dne 8.5.2006	122
Obrázek 14.8 - Teoretický výkon statického panelu vztažený k řízení dle času ze dne 8.5.2006	122

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 – Seznam podpůrných akcí pro fotovoltaiku	15
Tabulka 4.2 – Přehled nejvýznamnějších fotovoltaických systémů v ČR k roku 2004.....	16
Tabulka 4.3 – Instalovaný výkon obnovitelných zdrojů energie v roce 1995 a v roce 2010...	18
Tabulka 4.4 – Odhad vhodných ploch pro instalaci solárních panelů.....	21
Tabulka 5.1 – Druhy základních křemíkových fotovoltaických článků	23
Tabulka 5.2 – Teoretická účinnost fotovoltaických článků	26
Tabulka 5.3 – Přehled nejdůležitějších polovodičových materiálů (Olehla, P.).....	27
Tabulka 5.4 – Hodnoty panelu udané výrobcem a vypočtené dle metody z modelu 2.....	40
Tabulka 6.1 – Výpočet τ a úhlu δ pro charakteristické dny v roce	45
Tabulka 6.2 – Výpočet úhlu δ pro charakteristické dny v roce.....	46
Tabulka 6.3 – Tabulka úhlu T pro různé denní hodiny	47
Tabulka 6.4 – Tabulka úhlu T pro různé denní hodiny, upravené dle časové rovnice pro den 22.6.	49
Tabulka 6.5 – Azimut Slunce v charakteristických dnech ve 13 hodin	50
Tabulka 7.1 – Hodnoty maximálních výkonů v charakteristických dnech	64
Tabulka 11.1 – Ideální hodnoty úhlů sklonu panelu pro různé hodnoty Z a ϕ	78
Tabulka 14.1 – Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro reálné měření.....	115
Tabulka 14.2 – Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro zidealizované měření	116
Tabulka 14.3 - Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro reálné měření	117
Tabulka 14.4 - Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro zidealizované měření .	118
Tabulka 14.5 - Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro reálné měření	119
Tabulka 14.6 - Celkové energie a jejich procentuální porovnání pro reálné měření	119
Tabulka 14.7 – Tabulka porovnání energií řízeného a neřízeného panelu z modelu řízení dle Slunce s teoretickými energiemi	120
Tabulka 14.8 - Tabulka porovnání energií řízeného a neřízeného panelu z modelu řízení dle času s teoretickými energiemi	120
Tabulka 14.9 – Souhrn naměřených dat pro řízení dle času a dle Slunce v letním a zimním provozu.....	123
Tabulka 16.1 – Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle času, letní provoz.....	126
Tabulka 16.2 - Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle Slunce, letní provoz.....	127
Tabulka 16.3 – Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle času, zimní provoz.....	128
Tabulka 16.4 - Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle Slunce, letní provoz.....	129
Tabulka 16.5 – Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle času, průměrné výkony z letního a zimního měření.....	130
Tabulka 16.6 – Ukázka získané energie, ceny za 1kWh a peněžní zisk za 1 den měření dle Slunce, průměrné výkony z letního a zimního měření.....	131

Publikace k tématu

- 1) Oliva P.: Laboratorní model řízení fotovoltaických článků, *diplomová práce*, Liberec 2003
- 2) Oliva P., Motl Z.: Slight turning of photovoltaic panels by date, In: *sborník ze sjezdu kateder kybernetiky*, Bratislava, 2004, ISBN 80-227-2106-9
- 3) Oliva P., Olehla P., Olehla J.: Mechanismy pro natáčení fotovoltaických panelů, In: *sborník z konference Process Controll*, Pardubice, 2004, ISBN 80-7194-662-1
- 4) Oliva P., Olehla P., Olehla M.: Použití PLC k ovládání krokového motoru, In: *sborník z konference Process Controll*, Pardubice, 2004, ISBN 80-7194-662-1
- 5) Oliva P.: Positioning of the Slope Angle of Uncontrolled Solar Panel, In: *sborník z konference Principia Cybernetica*, Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0773-4
- 6) Oliva P., Motl Z.: Control of the photovoltaic panels by auxiliarypanel, In: *sborník z konference Process Controll*, Bratislava, 2005, ISBN 80-2272-106-9
- 7) Oliva P., Motl Z.: The laboratory model of control of the photovoltaic panel by time, In: *sborník z konference Process Controll*, Pardubice, 2006, ISBN 80-7194-860-8
- 8) Oliva P., Oliva J.: The laboratory model of control of the photovoltaic panel by Sun, In: *sborník z konference Process Controll*, Pardubice, 2006, ISBN 80-7194-860-8
- 9) Oliva P.: Porovnání řízeného natáčení fotovoltaických panelů dle času a dle skutečné polohy Slunce, In: *ACC Journal*, Technická univerzita v Liberci, 2007, ISBN 978-80-7372-238

Publikace mimo téma

- 1) Oliva, P., Motl, Z.: Using of WAP for diagnostics and administration of servers platform Unix, In: *sborník z konference Process Controll*, Bratislava, 2005, ISBN 80-2272-106-9
- 2) Oliva. P., Motl, Z.: Using of Strus framework for Model-View-Control design, In: *sborník z konference Process Controll*, Bratislava, 2005, ISBN 80-2272-106-9
- 3) Oliva, P., Motl, Z., Moučka, M.: Mathematic model of Pneumatic system, In: *sborník z konference Process Controll, Pardubice*, 2006, ISBN 80-7194-860-8

Přílohy

- 1) Fotografie laboratorního modelu řízeného natáčení fotovoltaických panelů dle času



2) Fotografie laboratorního modelu řízeného natáčení fotovoltaických panelů dle Slunce

